SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©CHAVAN-DAYZ/SHUTTERSTOCK/PHOTOMONTAGE SETA
SCIENCE PHOTO LIBRARY/SCIEPRO

LES MAMMOUTHS RESSUSCITÉS p.40

Conscience • Émotions • Révolution en imagerie cérébrale

LA SCIENCE LIT DANS LES PENSÉES p.54

MYSTÈRE AUX CONFINS DU SYSTÈME SOLAIRE p.32

DÉCEMBRE 2022 - N° 910 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 910 S - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 910 - DÉCEMBRE 2022 - LA SCIENCE LIT DANS LES PENSÉES

3008

HYBRIDE RECHARGEABLE

L'ALLURE FAIT
TOUTE LA DIFFÉRENCE

PEUGEOT i-Cockpit® avec vision de nuit.*
Conduite semi-autonome.*
Jusqu'à 59 km d'autonomie électrique.**

Pour les trajets courts, privilégiez

PEUGEOT RECOMMANDE TotalEnergies **Consommation mixte WLTP (1) (l/100km) : 1,2 à 1,4.**

(1) Ces valeurs peuvent varier en fonction des conditions réelles d'utilisation et de différents facteurs. Plus d'informations auprès de votre point de vente ou sur https://www.peugeot.fr/marque-et-technologie/wltp.html – Automobile PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles. * De série, en option ou indisponible selon les versions. ** L'autonomie de la batterie peut varier en fonction des conditions réelles d'utilisation. OPEn–Automobiles PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles.

la marche ou le vélo. #SeDéplacerMoinsPolluer

CROISIÈRE ISLANDE

par Voyages d'exception

UNE CROISIÈRE POUR VIVRE DES MOMENTS D'EXCEPTION

DÉPARTS EN JUIN 2023

Embarquez à bord du Seaventure (82 cabines seulement) pour découvrir les lumières époustouflantes des fjords et admirer les baleines glissant dans les eaux cristallines. Laissez vous tenter par une délicieuse baignade dans une source d'eau chaude et profitez des conférences de notre naturaliste à bord Sylvain Mahuzier.

DEMANDEZ NOTRE BROCHURE DÉTAILLÉE

au 01 75 77 87 48, par e-mail à contact@voyages-exception.fr,
sur www.voyages-exception.fr/brochures, (code ISLAS à renseigner).

© L'Agence de Presse - Photos : © Shutterstock.

EDF

Devenons l'énergie qui change tout.

IL NE SERA PAS MIEUX CHARGÉ SI ON LE LAISSE BRANCHÉ.

Éteindre vraiment ou débrancher ses appareils, c'est jusqu'à 5 %* d'économies sur sa facture.

Je baisse J'éteins Je décale

Découvrez les gestes utiles pour vous et pour tous.

RCS PARIS 552 081 317

Chaque geste compte
ÉCONOMISONS L'ÉNERGIE

edf.fr/gestesutiles

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

*Source EDF : Estimation août 2022 sur la base d'une sélection d'équipements multimédia et machines, pour un client TRV option base. Selon l'ADEME – « Guide pratique : réduire sa facture d'électricité » – juillet 2022 – l'ensemble des appareils en veille peut représenter jusqu'à 15 % de la facture d'électricité (hors chauffage et eau chaude).

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Sauveur de mondes

Les collisions de lectures sont des agitatrices utiles à la chimie de l'esprit. À preuve, cette expérience personnelle récente. Dans un premier temps, nos neurones savouraient l'humour tout britannique du professeur de physique-chimie Tim James évoquant *« l'élément le plus inutile du monde »* dans son passionnant ouvrage *Magique Atome* (éditions Dunod).

Or, carbone, silicium. Précisons que ce livre joue sur des touches bien spéciales, celles qui composent le fameux tableau de Mendeleïev, ordonnancement génial des 118 éléments connus aujourd'hui, qui constituent tout l'Univers. On y trouve le carbone comme l'hydrogène ou l'argon, l'or comme l'argent ou le plomb, le silicium comme l'uranium ou les terres rares… En 2019, notre magazine n'avait pas manqué de lui rendre hommage, lors de l'Année internationale du tableau périodique des éléments de l'Unesco, cent cinquante ans après son élaboration par le chimiste russe.

Fétiche scientifique. Si certains adorent le tableau tel un fétiche scientifique, beaucoup l'ignorent superbement. *« Nous savons que les éléments existent, mais nous ne pensons jamais trop à ce qu'ils sont ou à ce qu'ils font »*, écrit Tim James sans illusion. Sauf quand la réflexion entre en collision avec celle d'un autre ouvrage… Telle celle de la romancière canadienne Margaret Atwood — connue pour son best-seller dystopique *La Servante écarlate*, dans son livre récent *Questions brûlantes* (éditions Robert Laffont).

Deuxième chance. À l'heure où des gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O…) s'accumulent dans l'atmosphère terrestre (N_2, O_2…) qui se réchauffe alors dangereusement, Margaret Atwood insiste sur le fait que *« la Nature se fiche pas mal de nos souhaits humains »* et que *« la physique et la chimie n'accordent pas de deuxième chance »*. Pas de deuxième chance? Sauf à rappeler les solutions apportées par les deux sciences susnommées.

Éloge de l'hydrogène. L'optimiste Tim James souligne ainsi que l'hydrogène (H_2) est *« le carburant le plus propre […]. Quand il brûle, le seul sous-produit de sa combustion, c'est de l'eau »*. Et de qualifier le premier des éléments du tableau et plus abondant de tous de… *« sauveur de mondes »*. Tout comme il fait l'éloge de l'usage du prosaïque n° 17, le chlore. Il tue les bactéries ayant tendance à proliférer dans l'eau, causes de multiples épidémies à travers les siècles. Sauveur de vies.

Partie de la Nature. Si Tim James dit croire *« sincèrement que la science sauvera notre espèce »*, Margaret Atwood, elle, redoute notre échec à comprendre que *« nous faisons partie de la Nature »*. La chimie pourrait-elle les réconcilier? Elle donne en tout cas la très substantielle *« formule d'un être humain »* dans *Magique Atom*e. On y découvre que nous sommes constitués de 21 éléments différents, de l'hydrogène au cobalt, en passant par les indispensables oxygène, carbone, azote, calcium, fer ou potassium… Pas de trace en revanche du dysprosium, l'élément le plus inutile du monde. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Biochar, le nouvel or noir »

(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 908, octobre 2022)

Vous présentez le biochar comme une technique prometteuse capable *« de soustraire du CO_2 de l'atmosphère et de remplacer les engrais chimiques »*. Je m'interroge sur la réalité de ces deux avantages. En effet, cette technique utilise de la biomasse qui a auparavant soustrait du CO_2 de l'atmosphère : le travail est déjà fait. Ensuite, les gaz obtenus, dont principalement du méthane, seront brûlés pour produire chaleur ou électricité. Ce faisant, ils dégageront… du CO_2. Quant à dire que le carbone issu de ce procédé serait *« stocké dans le sol pour des centaines d'années »*, cela paraît utopique puisque le carbone s'oxyde naturellement dans le sol agricole et dégage du… CO_2. Un enfouissement profond en zone anaérobie pourrait bloquer durablement ce carbone. Mais ce n'est pas l'objectif de l'agriculture. Par ailleurs, un résidu de ce procédé, composé à 85 % de carbone, ne saurait être un engrais, les racines des plantes ne pouvant pas absorber cet élément. Ce « charbon » qui pourrait améliorer la structure des sols serait donc un amendement et non un engrais.

Alain Bouchet

S. et A. : Toute la littérature scientifique consultée pour la rédaction de cet article confirme que le carbone est bien capté pour des décennies. Notamment deux documents qui sous-tendent la plupart des études menées actuellement sur ce sujet : la méthodologie développée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) pour évaluer justement la durée du stockage, ainsi que la synthèse des travaux de Johannes Lehmann de l'université Cornell (États-Unis). Par ailleurs, vous avez raison de relever l'erreur de terminologie. Le carbone est bien un amendement et non un engrais.

Méthane de synthèse

Je suis resté abasourdi devant un entrefilet sur la fabrication de méthane de synthèse (*S. et A.* n° 909) ! Qu'on utilise de l'électricité (éolien ou solaire) pour produire de l'hydrogène : très bien ; mais qu'on se donne la peine de le recombiner avec du CO_2 (ça ne doit pas non plus être effectué sans une débauche d'énergie) pour en faire du méthane, qu'on va brûler ensuite en dégageant du CO_2, ça me dépasse ! Quel est l'intérêt ?

Christophe Lacoudre

S. et A. : L'intérêt de la technologie à plasma froid développée par Chimie ParisTech est qu'elle s'opère à température et pression ambiantes et donc sans consommation d'énergie. Un mégawatt de méthane ne nécessite que 10 kW de plasma, soit 1 % de la production. Transformer l'électricité issue des énergies renouvelables en hydrogène permet de stocker cette électricité quand elle est produite en excès. Mais l'hydrogène, en l'état actuel des techniques, ne peut être adjoint pur au réseau de gaz que dans une proportion inférieure à 10 %. La méthanation permet de passer cet obstacle en utilisant par ailleurs du CO_2 émis par une industrie. Ce CO_2 est en effet relargué lors de la combustion du méthane de synthèse, mais l'opération est neutre.

Rotation de la Terre

Je vous écris pour obtenir des éclaircissements sur un phénomène dont on parle peu : la rotation sur lui-même de l'axe de la Terre qui présente un angle de 21° par rapport au plan de l'écliptique. Or cette rotation interfère sur l'évolution de notre climat ! Ainsi, un jour, notre Terre en été occupera, après 180° de rotation de son axe sur lui-même, la même position dans l'espace qu'elle a en hiver.

Charles Coulon

S. et A. : Les mouvements de la Terre sur elle-même sont effectivement assez complexes et peuvent être vus comme la somme de plusieurs mouvements : la rotation sur elle-même en 86 164 secondes (ce qu'on appelle le jour sidéral), la précession — qui est ce mouvement de rotation de l'axe de la Terre en 26 000 ans — et la nutation, qui consiste en de petites variations périodiques de la direction de l'axe de rotation de la Terre, qui se superpose aux mouvements précédents. Pour ce qui est des saisons, c'est effectivement l'effet d'inclinaison de 23°26'de la Terre sur l'écliptique qui en est la cause essentielle. Et vous avez raison : il y a 13 000 ans (ou dans 13 000 ans), l'axe de la Terre ayant tourné de 180°, les saisons étaient inversées entre les hémisphères (ou seront inversées si on se projette dans le futur), puisque c'est cette inclinaison qui est le facteur principal des saisons.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Cerveaux éclairés

Lire dans le cerveau ! *Sciences et Avenir–La Recherche* aurait-il cédé aux sirènes du sensationnalisme ? Non, ce sont les progrès de la neuro-imagerie, des interfaces cerveau-machine et de l'intelligence artificielle qui sont sensationnels. Une personne totalement paralysée communique avec son enfant, une autre qui a perdu l'usage de ses membres parvient à écrire « par la pensée » sur un ordinateur, une autre encore, tétraplégique, réussit seule à attraper une bouteille et boire à la paille. Autant d'exploits permis par un décryptage inédit des messages que le cerveau continue à émettre même quand le corps ne répond plus. Et ce n'est que le début. Avec les données de l'activité du cerveau enregistrées par IRM fonctionnelle et un algorithme d'intelligence artificielle, des scientifiques parviennent à reconstituer des visages observés par un patient avec un réalisme stupéfiant. Au-delà, ce ne sont pas moins de 50 tâches cognitives que l'on sait maintenant décoder dans le cerveau. Paradoxalement, ces progrès fascinants sont réalisés alors que le fonctionnement intime du cerveau nous échappe toujours. Mais tout cela est-il bien raisonnable ? Justement parce que les techniques ne sont pas encore abouties, il est temps de se poser la question. Nos pensées demeurent notre dernier espace d'intimité. Prétendre les décoder ne devra jamais être envisagé sans considérer notre consentement. Le risque d'un mésusage des technologies en développement est réel. D'autant que certains, à commencer par l'incontournable entrepreneur milliardaire Elon Musk, n'envisagent pas un futur sans elles. Pour augmenter nos capacités cérébrales, interagir avec notre environnement, voire le piloter par la pensée. Aussi avons-nous décidé de consacrer tout un dossier à cette question. Pour démêler la réalité des fantasmes, expliquer les enjeux et les risques de cette révolution, donner les clés qui permettront à chacun de prendre position de façon éclairée sur les questions éthiques. Pour ne tomber ni dans le sensationnalisme, ni dans l'alarmisme. Et comprendre l'une des plus grandes avancées scientifiques du début du XXIe siècle. ■ @mathieu_nowak

> « Il s'agit de démêler la réalité des fantasmes, d'expliquer les enjeux et les risques d'une des plus grandes avancées scientifiques du début du XXIe siècle »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de la rédaction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, F. ELMALEH, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, F. NOIRIT
Secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines
Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,014 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte les encarts « Montre Vuillemin Regnier -Sophia Boutique », « Restos du Cœur », les messages « L'Histoire » et « First voyages » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Jusqu'où peut-on aller

lorsque l'on est bien accompagné ?

Organiser votre patrimoine, préparer une transmission, investir sur les marchés. Vos aspirations n'appartiennent qu'à vous. Nos conseillers et nos experts vous accompagnent pour définir une stratégie financière qui corresponde à vos objectifs et surtout, qui vous corresponde.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 808 501 050 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.

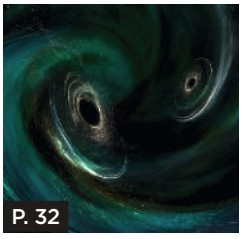
SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 910 / Décembre 2022

DOSSIER P. 54

La science lit dans les pensées

Traduire les ondes cérébrales en mots ou en images est devenu une réalité grâce à la montée en puissance de l'intelligence artificielle associée à la finesse des appareils de neuro-imagerie. Des avancées spectaculaires pour faire parler des personnes totalement paralysées ou augmenter les capacités cérébrales.



P. 32

Trous noirs : mystère aux confins du Système solaire

Au-delà de Neptune, les modèles peinent à expliquer les orbites de certains objets sans la présence d'un corps massif. S'agirait-il d'un trou noir primordial ? Un astre longtemps resté hypothétique.

P. 40

Désextinction : le nouveau futur des espèces éteintes

Des scientifiques tentent de « déséteindre » des animaux disparus tel le dodo en créant des espèces hybrides. Non sans poser des questions éthiques et écologiques.

P. 76

Momies : l'énigme du cimetière de San Bernardo

Dans un village de Colombie, les corps des défunts se momifient spontanément. Les chercheurs veulent trouver une explication au phénomène. Reportage.

7 **Éditorial** par Dominique Leglu

8 **Courrier**

9 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** La Lune s'est formée en seulement quelques heures / La marche propulsée par des bottes robotiques

32 **Trous noirs : mystère aux confins du Système solaire**

37 **La cyberguerre a déjà commencé**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Des insectes volent des gènes aux plantes / La diversification des cultures améliore les rendements

40 **Désextinction : le nouveau futur des espèces éteintes**

48 **Manifeste pour une civilisation de l'océan**

50 **Dossier spécial sobriété énergétique**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** La méditation pour se libérer des opioïdes / Grippe et bronchiolite s'hybrident dans une cellule

68 **Cancer du poumon, l'urgence du dépistage**

72 **Carton rouge pour les commotions cérébrales**

74 **Nutrition : ces atouts qui plaident en faveur de l'avocat**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** Neve, la petite défunte du mésolithique / Le catalogue des étoiles d'Hipparque se dévoile

76 **Momies, l'énigme du cimetière de San Bernardo**

82 **Sapiens-Neandertal, pour quelques neurones de plus**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **C'est à voir**

93 **Le ciel de décembre**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

WYSS CENTER - LIGO/CALTECH/MIT:SONOMA STATE (AURORE SIMONNET) - SPL/SUCRÉ SALÉ - JUANCHO TORRES/GETTY IMAGES

Environ 60 % des débris pulvérisés dans l'espace lors du choc avec une protoplanète et ayant formé notre satellite sont d'origine terrestre.

NASA'S AMES RESEARCH CENTER

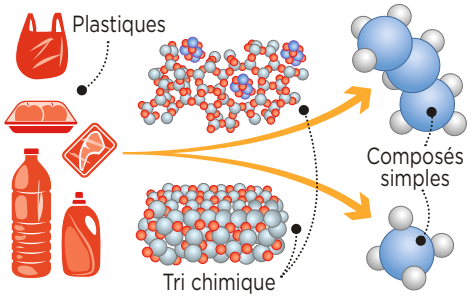
La Lune s'est formée en seulement quelques heures

De nouvelles simulations numériques ont affiné le processus d'agrégation des débris issus de la collision d'un corps céleste avec la Terre.

Il y a 4,5 milliards d'années, une protoplanète de la taille de Mars serait entrée en collision avec la Terre primitive. Éjectés dans l'espace, les débris se seraient ensuite progressivement agrégés jusqu'à former notre satellite naturel. Tel est le scénario que les scientifiques privilégient depuis les années 1980 pour expliquer l'origine de la Lune. Mais les experts s'écharpent sur les circonstances précises de ce phénomène. « *Les modèles peinent à reproduire l'ensemble des caractéristiques de l'astre, comme son orbite précise ou les très grandes similitudes chimiques entre les roches terrestres et lunaires* », souligne Frédéric Moynier, cosmochimiste à l'Institut de physique du globe de Paris. Or, des simulations numériques réalisées par des planétologues de la Nasa et de l'université de Durham (Royaume-Uni) indiquent que notre compagnon céleste se serait formé, non pas en quelques mois voire plusieurs années comme on le pensait jusqu'ici, mais en seulement quelques heures !

400 collisions testées dans un supercalculateur

L'équipe a utilisé le supercalculateur Cosma, dont la puissance équivaut à celle de 40 000 ordinateurs personnels. 100 millions de particules du système Terre-Lune ont été prises en compte, contre 100 000 à 1 million dans les travaux précédents. Et 400 collisions ont été simulées avec une résolution inédite, en faisant varier des paramètres comme la masse, la composition et la trajectoire de l'impacteur. Ce faisant, les chercheurs ont pu identifier les modalités reproduisant le mieux les caractéristiques de la Lune. L'astre sélène se serait ainsi agrégé et stabilisé en moins de dix heures sur une orbite suffisamment lointaine à partir des gerbes de matière éjectées dans l'espace. Celles-ci devaient être constituées à 60 % de matériaux issus de la Terre primitive, le reste venant de la protoplanète. Une proportion plus importante qu'on imaginait, notamment dans les couches superficielles de la Lune où les matériaux ont fusionné avant de refroidir et former une fine croûte. Ce nouveau canevas explique ainsi les très grandes similitudes entre les roches terrestres et lunaires, tout comme l'orbite et la structure de notre satellite. « *C'est une théorie séduisante,* juge Frédéric Moynier. *Elle devra toutefois être étayée par la collecte de nouveaux échantillons lunaires, au pôle sud et sur la face cachée notamment, comme le prévoient des missions américaines et chinoises dans les années qui viennent.* » ■ **F. D.**



BRUNO BOURGEOIS

Le nouveau procédé permet le tri chimique des différents emballages plastiques.

Une technique pour recycler des mélanges de plastiques

CHIMIE Pour être recyclés, les différents types de plastiques doivent en principe être séparés. Mais des chimistes américains développent une technique permettant de traiter chimiquement ces mélanges (bidons de lait, emballages alimentaires, tasses à café jetables, etc.). Des catalyseurs les dégradent d'abord en acides benzoïque, téréphtalique et dicarboxylique. Puis, ces molécules sont transformées par des bactéries du sol (*Pseudomonas putida*) en un seul composé, servant à fabriquer du nylon biodégradable notamment. **F. D.**

SOURCE : KEVIN SULLIVAN, LABORATOIRE AMÉRICAIN POUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES, ÉTATS-UNIS.

17 heures

La durée d'une journée sur Terre il y a 2,46 milliards d'années

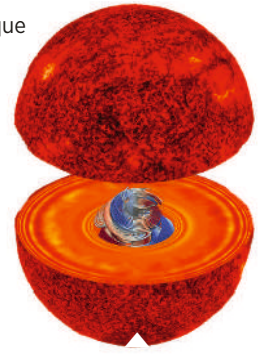
GÉOLOGIE **C'est en étudiant de très anciennes couches sédimentaires, à l'ouest de l'Australie, que des géologues sont parvenus à établir que la Lune était à l'époque bien plus proche de notre planète — 320 000 km contre 380 000 km aujourd'hui. De sorte que la rotation de la Terre était plus rapide, produisant des journées plus courtes.** **F. D.**

SOURCE : MARGRIET LANTINK, UNIVERSITÉ D'UTRECHT, PAYS-BAS.

Des champs magnétiques au cœur d'une étoile

ASTROPHYSIQUE Pour la première fois, des champs magnétiques ont été détectés dans les noyaux de trois géantes rouges par des chercheurs du CNRS, grâce aux données du satellite Kepler de la Nasa.
Le champ magnétique a une influence importante sur le mélange interne des éléments chimiques d'une étoile et affecte donc son évolution. Mais, du fait de l'opacité de la matière stellaire, il n'avait encore jamais été détecté à l'intérieur d'une étoile. **S. R.**

SOURCE : GANG LI, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.



BALLOT, JOUVE, AIA/SDO

Une géante rouge renfermant un intense champ magnétique dans son noyau (illustration).

EN DEUX MOTS

GÉOCROISEUR Un astéroïde de 1,5 kilomètre de large, 2022 AP7, avec une trajectoire croisant celle de la Terre, a été détecté comme nouvelle menace potentielle. **UKRAINE** L'Unesco, qui se sert d'images satellites pour surveiller le patrimoine ukrainien, a enregistré des dommages sur plus de 207 sites culturels depuis le début de la guerre. **ASTRONOMIE** Effondré en 2020, le célèbre télescope d'Arecibo (Porto Rico) ne sera pas remplacé, mais un centre d'enseignement des sciences sera construit à la place.

Twitter, outil de motivation pédagogique

Des cours universitaires enrichis par des tweets amélioreraient l'implication des étudiants.

Accompagner leurs cours magistraux de première année d'un fil Twitter. C'est l'initiative étonnante d'un groupe d'enseignants-chercheurs en psychologie cognitive à l'université Rennes-2 (Ille-et-Vilaine) qui a testé le réseau social, récemment racheté par le milliardaire Elon Musk, comme béquille pédagogique pour leurs étudiants. Trois ou quatre tweets étaient postés par semaine durant les premiers semestres de 2017, 2018 et 2019 : articles de presse, quiz, vidéos sur des sujets abordés en cours, etc. Un questionnaire conçu sur le modèle de l'échelle de motivation globale a permis de mesurer la motivation et l'intérêt des étudiants avant la mise en route du fil, puis en fin de semestre. Bilan ? La motivation intrinsèque moyenne pour le cours s'améliore nettement chez les étudiants ayant interagi avec les tweets, pas chez les autres. Le fil Twitter n'a pas eu d'effet sur la motivation extrinsèque — liée à d'autres facteurs que le cours lui-même. **A. D.**

JAKUB PORZYCKI / NURPHOTO / AFP

Le compte créé sur le réseau social par les professeurs comportait des vidéos et des articles à destination des étudiants.

La naissance d'un trou noir observée « en direct »

ASTROPHYSIQUE C'est le sursaut gamma le plus brillant jamais enregistré qu'ont capté de nombreux observatoires le 9 octobre dernier, selon la Nasa. Baptisé GRB 221009A, ce flash de photons à très haute énergie correspondrait à l'explosion d'une étoile massive (supernova) ayant entraîné la formation d'un trou noir à 2,4 milliards d'années-lumière de la Terre. **J. I.**

NASA/ESA/CSA/AFP

La structure interstellaire immortalisée par Hubble en 1995 (à gauche) bénéficie désormais de la nouvelle optique du JWST (à droite).

L'IMAGE DU MOIS

Les Piliers de la création sublimés par le télescope James-Webb

ASTRONOMIE Les célèbres colonnes de poussières interstellaires immortalisées en 1995 par le télescope Hubble apparaissent maintenant grâce à l'optique infrarouge du nouveau télescope JWST de la Nasa. De quoi percer l'opacité des Piliers de la création et révéler des milliers de nouvelles étoiles en gestation. La scène est aussi illuminée en arrière-plan par des milliers d'astres qui étaient masqués par la poussière. Ce cliché permettra d'affiner les modèles de naissance et de formation d'étoiles. **J. I.**

La marche propulsée par des bottes robotiques

L'exosquelette est capable de s'adapter à son porteur, grâce à un modèle basé sur l'apprentissage automatique.

STANFORD BIOMECHATRONICS LABORATORY

Le dispositif fixé aux chevilles et concentré sur l'action du mollet a permis au marcheur un gain de rapidité de 9 %.

Selon ses concepteurs du laboratoire de biomécatronique de l'université Stanford (États-Unis), le dispositif est prêt pour une commercialisation. Cet exosquelette d'aide à la marche se fixant à la cheville est doté d'un moteur qui fonctionne avec les muscles du mollet pour donner une poussée supplémentaire à chaque pas. Mais sa particularité réside dans sa personnalisation : au lieu d'avoir des réglages génériques qui rendent souvent ce genre d'équipements difficiles à utiliser, une phase d'apprentissage sert à bâtir le modèle de marche d'une personne en particulier. Pour cela, le dispositif collecte les données de mouvements de la cheville et l'énergie dépensée pour se mouvoir avec les bottes robotiques. Cette analyse est effectuée en conditions réelles par les bottes grâce à des capteurs intégrés. Les tests ont abouti à une baisse de 17 % de l'énergie dépensée par le porteur et à 9 % de rapidité en plus. **A. D.**

Un organoïde cérébral apprend à jouer à Pong

BIO-INFORMATIQUE Des neurones cultivés en laboratoire autour de matrices de microélectrodes ont été capables d'apprendre à jouer à une version simplifiée de Pong, le célèbre jeu vidéo de tennis. Cherchant d'instinct à minimiser l'imprévisibilité de leur environnement, les cellules ont pu envoyer des signaux électriques pour déplacer la raquette au bon endroit et stabiliser ainsi leur environnement. **C. G.**

SOURCE : BRETT KAGAN, CORTICAL LABS, AUSTRALIE.

Une caméra sous-marine alimentée par ondes sonores

ADAM GLANZMAN

L'appareil transforme en électricité l'énergie des sons aquatiques.

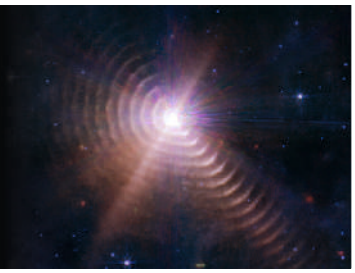
TECHNOLOGIE Sans fil ni batterie, cet appareil est doté de transducteurs qui transforment en électricité l'énergie mécanique des sons passant dans l'eau (faune, bateaux). Dès qu'assez d'énergie est accumulée, la caméra s'enclenche pour filmer mais aussi transmettre les vidéos. Posée sur un fond marin, elle est destinée à une observation locale, notamment celle des effets du réchauffement climatique. **A. D.**

SOURCE : SAYED SAAD AFZAL, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

La toile d'araignée stellaire n'est pas une structure extraterrestre

ASTRONOMIE Dix-sept anneaux concentriques entourant une étoile : cette image du télescope James-Webb a interpellé les astronomes mais aussi les ufologues qui y ont vu une structure extraterrestre. En réalité, ces anneaux sont des coquilles de poussières, nés de l'interaction de deux astres très proches dont l'un est une étoile massive qui, en fin de cycle, expulse la matière entourant son noyau. J. I.

SOURCE : YINUO HAN, UNIVERSITÉ DE SYDNEY, AUSTRALIE.



NASA/ESA/CSA/STSCI/JPL-CALTECH.

L'accélérateur de particules LHC mis à la diète énergétique

PHYSIQUE En raison de la crise énergétique, la plus grande expérience scientifique au monde devra aussi faire des économies, a annoncé le Cern. Glouton énergétique, l'accélérateur de particules LHC de 27 km de long construit sous la frontière franco-suisse entamera son arrêt technique hivernal avec deux semaines d'avance, le 28 novembre, et réduira de 20 % ses opérations en 2023. **F. D.**

CERN

Le Cern, à Genève, va diminuer l'exploitation de ses accélérateurs de 20 % en 2023, dont le LHC.

11 minutes Le temps record pour recharger une voiture électrique

CHIMIE **Une nouvelle batterie lithium-ion à haute densité d'énergie (265 Wh/kg) utilisable dans des véhicules électriques a pu être rechargée à 70 % en un temps record. La performance tient à l'incorporation de feuillets de nickel permettant de réguler finement la température à l'intérieur même de la batterie qui se révèle aussi plus compacte.** **F. D.** SOURCE : CHAO-YANG WANG, UNIV. D'ÉTAT DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

Une étoile à neutrons trop légère pour être vraie

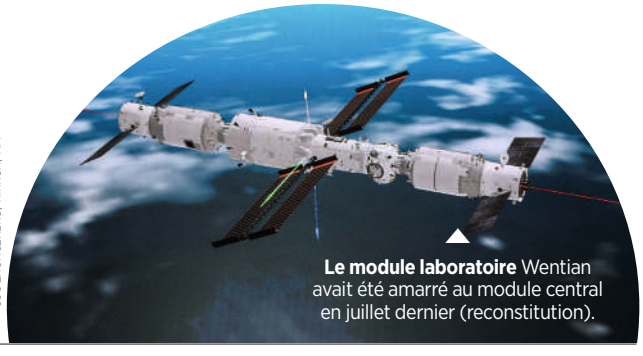
ASTROPHYSIQUE
En exploitant les données du satellite européen Gaia, les chercheurs ont découvert que l'astre HESS J1731-347, connu jusque-là comme étoile à neutrons, avait un diamètre de 20,8 kilomètres et une masse de seulement 0,77 masse solaire. Inférieure à la limite de 1,1 fixée par la théorie. Seule explication : il s'agirait d'une « étoile étrange » faite non pas de neutrons mais de quarks étranges, l'un des six types de quarks existants. **S. R.**

SOURCE : VICTOR DOROSHENKO, INSTITUT D'ASTRONOMIE DE TÜBINGEN, ALLEMAGNE.

La station spatiale chinoise est achevée

Plus de 1000 expériences scientifiques devraient être réalisées à bord de ses laboratoires orbitaux.

La Chine a lancé le 31 octobre le troisième module de sa station orbitale, désormais complète. Le module laboratoire Mengtian (rêve spatial) vient s'ajouter aux modules Tianhe, principal lieu de vie des astronautes, et Wentian, autre module laboratoire lancé en juillet dernier. La station spatiale, dont la construction a débuté à 425 km d'altitude en avril 2021, a une durée de vie prévue d'au moins dix ans, au cours desquels devraient être réalisées plus de 1000 expériences scientifiques. Un vaisseau cargo automatique doit encore rejoindre la station avant l'arrivée en décembre de trois astronautes à bord du vaisseau Shenzhou-15. D'un volume de 110 m^3 (soit moins d'un tiers de celui de l'ISS), la station est équipée de deux bras robotiques de 5 et 10 mètres, qui lui permettront d'assurer la maintenance du futur télescope spatial Xuntian : doté d'un miroir de 2 mètres semblable à celui d'Hubble mais avec un champ de vue 300 fois supérieur, il doit être placé en 2024 sur la même orbite que la station afin de pouvoir s'y amarrer périodiquement. **S. R.**



GUO ZHONGZHENG / XINHUA / AFP

Le module laboratoire Wentian avait été amarré au module central en juillet dernier (reconstitution).

STEPHEN AUSMUS - USDEPARTMENT OF AGRICULTURE

« Bemisia tabaci », un ravageur des cultures des régions tropicales et subtropicales, a intégré à son génome pas moins de 49 gènes de plantes.

Des insectes volent des gènes aux plantes

Ce transfert horizontal de gènes servirait à un moucheron à contourner les défenses des végétaux dont il se nourrit.

L'aleurode du tabac est un kleptomane spécialisé dans le vol génétique. À l'examen, le génome de ce moucheron des zones tropicales s'est révélé truffé de gènes « empruntés » aux plantes dont il se nourrit. Pas moins de 49 gènes végétaux ont ainsi été retrouvés chez *Bemisia tabaci*, selon l'étude publiée dans *Genome Biology and Evolution* par Florian Maumus, de l'Inrae, et Clément Gilbert, du CNRS. Jamais biologiste n'avait constaté autant de « transferts horizontaux » de gènes entre espèces aussi différentes. Le matériel génétique « volé » aux végétaux servirait à l'insecte à contourner les défenses de ces plantes.

« Difficile d'imaginer qu'un gène puisse être extrait d'un génome de plante, sorte du noyau, franchisse la barrière du tissu végétal, avant de pénétrer dans une cellule d'insecte, atteindre son noyau, pour finalement s'intégrer dans cet autre ADN, concède Florian Maumus. *C'est pourtant ce que nous constatons dans des proportions importantes.* »

Virus et bactéries serviraient de véhicules

Ces transferts seront difficiles à observer, car ils sont vraisemblablement le fruit d'une lente coévolution entre les plantes et leurs ravageurs. Pour autant, ils semblent être un « outil » évolutif répandu. Les chercheurs ont ainsi déterminé au moins 24 épisodes de transferts de plusieurs gènes, dont certains ont été dupliqués chez le moucheron pour les rendre plus efficients. Les scientifiques français suspectent les virus et les bactéries d'être les véhicules utilisés pour faire franchir au matériel génétique les barrières des cellules et des noyaux, mais cela reste à prouver. La prochaine étape sera d'abord de vérifier dans les génomes des 500 insectes déjà séquencés si les transferts horizontaux sont largement utilisés par les ravageurs des plantes. Et, peut-être, d'ouvrir la voie à de nouvelles techniques de protection des récoltes. ■ **L. C.**

3,8 °C

La hausse de température moyenne en France d'ici à 2100

CLIMATOLOGIE Selon de nouvelles projections intégrant des mesures collectées depuis plus d'un siècle, et donc plus proches de l'évolution réelle du climat, le réchauffement climatique atteindrait 3,8 °C par rapport au début du xx^{e} siècle dans un scénario d'émissions modérées des gaz à effet de serre. **S. R.**

SOURCE : AURÉLIEN RIBES, MÉTÉO FRANCE/CNRS, FRANCE.

BRUNO GUÉNARD/BIOSPHOTO

« Anguilla anguilla » parcourt quelque 10 000 km dans l'océan Atlantique pour se reproduire.

Les anguilles se reproduisent bien dans les Sargasses

ICHTYOLOGIE Grâce à des balises, des anguilles européennes de l'archipel des Açores ont été suivies dans leur migration jusque dans la mer des Sargasses, au large de la côte est de l'Amérique. C'est la première preuve que la reproduction de cette espèce en danger de disparition a bien lieu dans cette vaste zone de l'Atlantique. En 2016, une expérience avait montré que, de la Norvège à la Méditerranée, toutes les anguilles convergeaient vers les Açores, mais l'étape finale n'avait pu être enregistrée. **L. C.**

SOURCE : ROSALIND WRIGHT, ENVIRONMENT AGENCY, ROYAUME-UNI.

EN DEUX MOTS

MÉTÉO D'une intensité de catégorie 3 (vents à 250 km/h), la tornade qui a dévasté Bihucourt (Pas-de-Calais) le 23 octobre a parcouru une distance record en France de 147 km. **BIOCONTRÔLE** En diffusant des ultrasons mimant ceux des chauves-souris, des chercheurs ont réussi à repousser des noctuelles, papillons de nuit ravageurs des cultures. **POLLUTION** Une nouvelle mission de la Nasa a permis de détecter par satellite plus de 50 « super-émetteurs » de méthane en Asie centrale, au Moyen-Orient et aux États-Unis.

La fourmi électrique a débarqué dans le Var

ENTOMOLOGIE Une espèce invasive de fourmis d'Amérique du Sud a été détectée pour la première fois en France métropolitaine, près de Toulon (Var). Elle est réputée pour sa morsure douloureuse à laquelle elle doit son surnom de « fourmi électrique ». *« On a déjà affaire à une super-colonie, elle est donc là depuis plus d'un an »*, alerte Olivier Blight, chercheur à l'université d'Avignon, auteur de la découverte. **A.-S. T.**

VIRGINIA ROSE SEAGAL / UF/IFAS

« Wasmannia auropunctata » ne mesure que 1,5 millimètre mais représente une menace pour la biodiversité.

« Tara » boucle son tour du monde des microbiomes marins

Le célèbre bateau-laboratoire a collecté quelque 25 000 échantillons de micro-organismes dans les eaux de 14 pays.

FRED TANNEAU / AFP

La mission scientifique a parcouru 70 000 km pour sonder la diversité de l'écosystème océanique (ici de retour à Lorient, Morbihan, le 15 octobre).

La goélette *Tara* a achevé cet automne un périple de 70 000 km et presque deux ans, de l'Amérique du Sud à l'Afrique. Elle a collecté quelque 25 000 échantillons dans les eaux de 14 pays. Il y a dix ans, la fondation Tara ambitionnait de recenser la composition du plancton mondial : aujourd'hui environ 100 000 espèces marines ont été identifiées et l'enjeu est désormais de comprendre comment interagissent ces êtres qui constituent le microbiome marin et diffèrent selon les régions. Les scientifiques ont pour cela étudié comment les courants marins et les tourbillons océaniques influencent la distribution du microbiome, l'apport en nutriments des terres, des glaciers et des icebergs, la diffusion des polluants par les fleuves et le comportement des plastiques qui rejoignent les océans par les bassins-versants. Ils ont aussi suivi *in situ* l'évolution d'un *bloom* — prolifération — de microalgues au large de l'Argentine, une première dans cette région. **S. R.**

Un gouffre s'ouvre au Chili

GÉOLOGIE Un trou de 30 m de diamètre pour 60 m de profondeur s'est brutalement ouvert cet été à Tierra Amarilla, dans le nord du Chili. Un effondrement qui serait lié aux activités de la mine de cuivre voisine, exploitée par la société canadienne Lundin Mining. Celle-ci est accusée de surextraction du minerai et de l'eau de l'aquifère de la rivière Copiapó, dont 1,3 million de m^3 d'eau stagnent maintenant dans le trou. La mine est aujourd'hui définitivement fermée. **S. R.**

IL A DIT

« Ce navire, le moins émissif en CO_2 de toute la flotte mondiale, représente une nouvelle étape dans le cadre de la réduction de l'impact environnemental des paquebots »

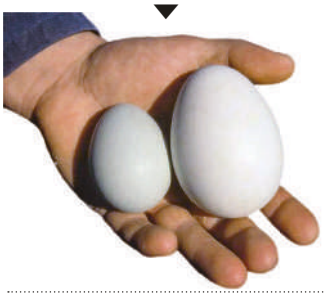
Laurent Castaing, directeur général des Chantiers de l'Atlantique, lors de la cérémonie de livraison à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique) du *MSC World Europa*, premier paquebot propulsé au gaz naturel liquéfié construit en France.

Le « choix de Sophie » du gorfou huppé

ORNYTHOLOGIE Espèce proche des manchots, les gorfous huppés ont un curieux comportement avec leurs œufs. Sur les deux qu'ils pondent à quelques jours d'écart chaque année, le premier, plus petit, finit soit écrasé, soit éjecté du nid à l'arrivée du second, plus gros. Des analyses révèlent qu'il s'agit d'un choix : l'incapacité à nourrir deux oisillons poussent les parents à ne garder que le plus gros. **A.-S. T.**

SOURCE : LLOYD DAVIS, UNIVERSITÉ D'OTAGO, NOUVELLE-ZÉLANDE.

Des deux œufs pondus chaque année, la femelle ne laisse éclore que le plus gros.



LLOYD DAVIS PHOTOGRAPHY / CC-BY 4.0

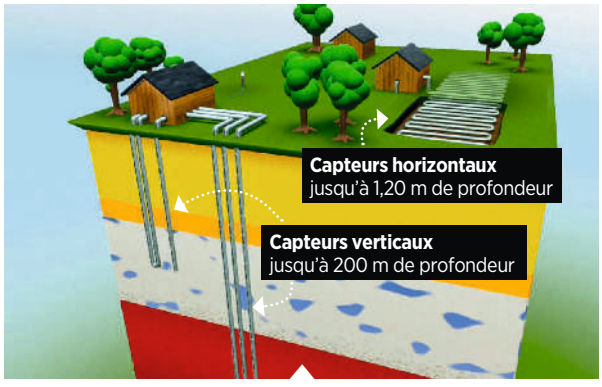
57 km

L'altitude record atteinte par le panache du volcan Hunga-Tonga

VOLCANOLOGIE La puissance de l'éruption du volcan Hunga-Tonga (océan Pacifique) en janvier dernier a été estimée par la Nasa entre 5 et 30 millions de tonnes de TNT, contre 1500 tonnes pour la bombe atomique d'Hiroshima en 1945. Le panache de cendres s'est élevé au-delà de la stratosphère, jusque dans la mésosphère, à 57 km de haut. Un record qui détrône l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines en 1991. **H. J.**

La géothermie de surface, une énergie décarbonée sous-exploitée

ÉNERGIE Chargé de la réflexion prospective pour l'État, le Haut-Commissariat au Plan (HCP) appelle à développer la géothermie de surface, y compris chez les particuliers. Cette technique capte la chaleur des sous-sols à des profondeurs variant de quelques mètres à 200 mètres pour la convertir en une énergie décarbonée et renouvelable. Le HCP espère passer de 2000 à 200 000 installations par an d'ici à 2030. **L. C.**



BRGM

Cette technique permet de capter la chaleur des sous-sols jusqu'à 200 mètres de profondeur et de la restituer en surface.

BERTRAND NICOLAS / INRAE

Association d'une culture d'orge avec une plantation de noyers dans la parcelle agroforestière du domaine de Restinclières (Hérault).

La diversification des cultures améliore les rendements

Il s'agit notamment d'éviter qu'un même patrimoine génétique ne favorise l'action des ravageurs.

La diversité végétale des espaces agricoles permet bien de protéger les cultures et d'améliorer les rendements. C'est la conclusion d'une expertise collective menée par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). À l'échelle de la parcelle, il s'agit d'augmenter des mélanges de variétés de semences afin d'éviter qu'un même patrimoine génétique ne favorise l'action des ravageurs. Mais les agriculteurs peuvent aussi semer des cultures associées, par exemple une céréale (blé, avoine, orge) avec une légumineuse (pois, féverole) ou encore recouvrir leurs sols de plantes entre deux cultures. Ces méthodes permettent de réduire les besoins en azote, empêche les adventices de pousser et augmente les teneurs en matière organique du sol. À l'échelle du paysage, la plantation de haies, la réduction de la taille des champs, l'introduction de nouvelles cultures dans les rotations annuelles sont les solutions préconisées. Des systèmes comme l'agroforesterie ou l'agriculture de conservation des sols sans labours profonds sont préconisés. **L. C.**

Bientôt du photovoltaïque vivant

BIO-INGÉNIERIE Des chercheurs ont réussi à intégrer des nanotubes de carbone fluorescents dans des cyanobactéries. Une prouesse car contrairement aux cellules de mammifères, ces bactéries aux parois résistantes ne sont pas capables d'endocytose (mécanisme d'absorption d'éléments étrangers). Objectif : la mise au point de panneaux solaires vivants, des dispositifs biologiques utilisant des micro-organismes photosynthétiques. **R. M.**

SOURCE : ARDEMIS BOGHOSSIAN, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, SUISSE.

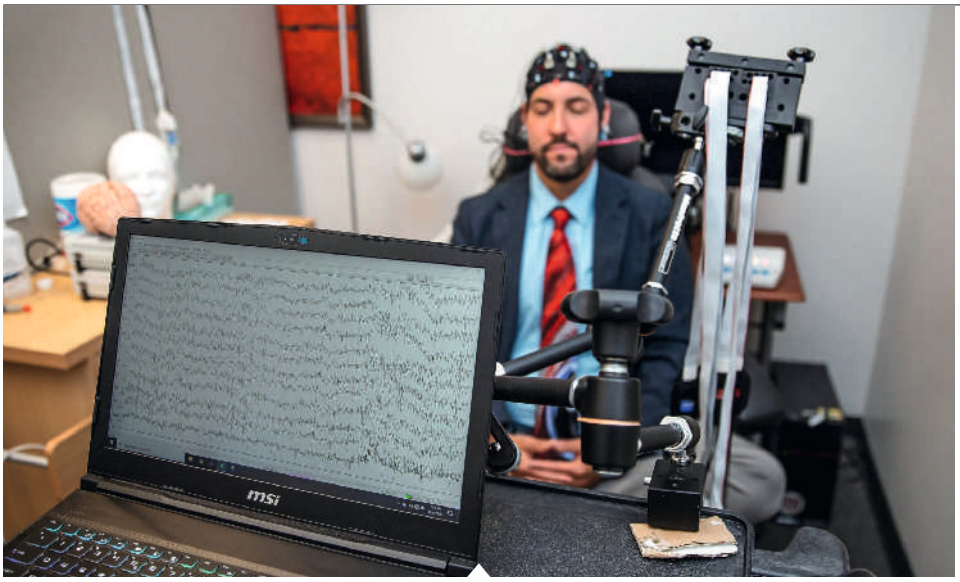
NOUVELLE MACHINE

VERTUO POP

LE CAFÉ FAIT SA RÉVOLUTION EN COULEURS

NESPRESSO

NESPRESSO France SAS - SIREN 382 597 821 - RCS PARIS 27 rue du Colonel Pierre Avia, 75015 Paris.



UNIVERSITY OF UTAH

Enregistrées par EEG, les ondes thêta produites dans le cerveau méditant améliorent le contrôle de soi.

La méditation pour se libérer des opioïdes

L'apprentissage de la méditation de pleine conscience aide le cerveau à se défaire de l'addiction aux antalgiques.

La méditation de pleine conscience peut aider à se libérer de l'emprise d'antalgiques analogues à la morphine, révèle une étude menée par Eric Garland et son équipe à l'université de l'Utah (États-Unis). Des patients qui abusaient de ces opioïdes, prescrits pour calmer des douleurs chroniques, ont réussi à normaliser leur consommation grâce à des séances de psychologie dispensées deux heures par semaine pendant deux mois et, surtout, renforcées par quinze minutes quotidiennes de méditation. L'amélioration semble liée à l'apparition d'ondes thêta entre 4 et 8 hertz, visibles par électroencéphalographie (EEG) à l'avant du cerveau des patients, dans des zones liées au contrôle de soi, à l'attention et à la concentration. Elle a perduré plus de neuf mois après l'apprentissage de la méditation de pleine conscience, signe que le cerveau avait appris à se détacher de l'emprise des drogues. Les chercheurs américains en déduisent que l'induction des ondes thêta par la pratique de la méditation pourrait contribuer à réduire les comportements d'addiction. Une première !

Amplifier les ondes bénéfiques

L'induction des ondes thêta dans le cerveau frontal pourrait être un moyen plus direct de reproduire les résultats bénéfiques de cette pratique. *« C'est possible par le* neurofeedback *cérébral, où des volontaires peuvent voir sur un écran leur production d'ondes thêta et apprendre à les amplifier par des exercices de concentration,* souligne Arnaud Delorme, spécialiste du sujet au CNRS et à l'université Paul-Sabatier à Toulouse. *Et ce procédé pourrait ainsi également être testé pour réduire les dépendances aux drogues.* » Un moyen encore plus direct serait de faire produire ces ondes thêta dans le cerveau frontal à l'aide de la stimulation magnétique transcrânienne, technique déjà utilisée à l'hôpital pour lutter contre des douleurs récurrentes. Ces approches, en cours d'étude, offrent ainsi de nouvelles perspectives pour atténuer les addictions, mais aussi les pensées obsédantes et les émotions envahissantes. ■ **P. K.**

L'« hormone de l'amour » soulage le cœur blessé

CARDIOLOGIE L'ocytocine, « hormone de l'amour » libérée par le cerveau dans le sang à l'accouchement, mais aussi lors de l'attachement social, stimule *in vitro* des cellules cardiaques capables de régénérer le cœur, révèlent des chercheurs américains. L'injection d'ocytocine ou, pourquoi pas, de solides liens sociaux et affectifs, pourrait ainsi aider à réparer le cœur après un accident cardiaque, suggère l'étude. **P. K.**

SOURCE : AARON WASSERMAN, UNIV. D'ÉTAT DU MICHIGAN, ÉTATS-UNIS.

JACK GUEZ / AFP

Les particules fines aggravent l'effet de l'infection.

La pollution de l'air favorise la mortalité due au Covid-19

INFECTIOLOGIE On sait maintenant pourquoi Brest et Bordeaux ont été moins touchées par le Covid-19 que Paris ou l'est de la France. Une comparaison de la mortalité entre 32 villes européennes a montré une corrélation forte entre les teneurs en particules fines dans l'air et l'impact de l'épidémie. Selon l'étude, en pénétrant très profondément dans les tissus pulmonaires, ces particules provoquent des lésions des bronches favorisant l'action du virus. **L. C.**

SOURCE : JEAN-BAPTISTE RENARD, CNRS ORLÉANS, FRANCE.

RCS Paris B 488 679 664 - 350 000 euros - Atout France IM 075 100 099 - Crédit Dreamstime

Croisière

Madère et l'archipel des Açores

D'avril à mai 2023

À bord du World Explorer, un yacht luxueux pour 180 passagers, mettez le cap sur l'Atlantique. Découvrez, sous un climat subtropical, des îles mystérieuses et paradisiaques sculptées par l'activité volcanique.

SA07

Découvrez la croisière :

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

44 Le nombre de groupes sanguins humains

HÉMATOLOGIE Nous nous étions arrêtés à 43 il y a un an *(lire S. et A. n° 896)*, mais un nouveau groupe sanguin — rarissime — a été identifié chez une patiente de l'hôpital de Bristol (Royaume-Uni), portant à 44 le nombre de groupes sanguins humains. Si la classification en huit groupes par les systèmes ABO et rhésus est la plus utilisée, il est plus précis de les compter selon les antigènes que les globules rouges portent à leur surface. **F. E.**

SOURCE : NICOLE THORTON, NATIONAL HEALTH SERVICE, ROYAUME-UNI.

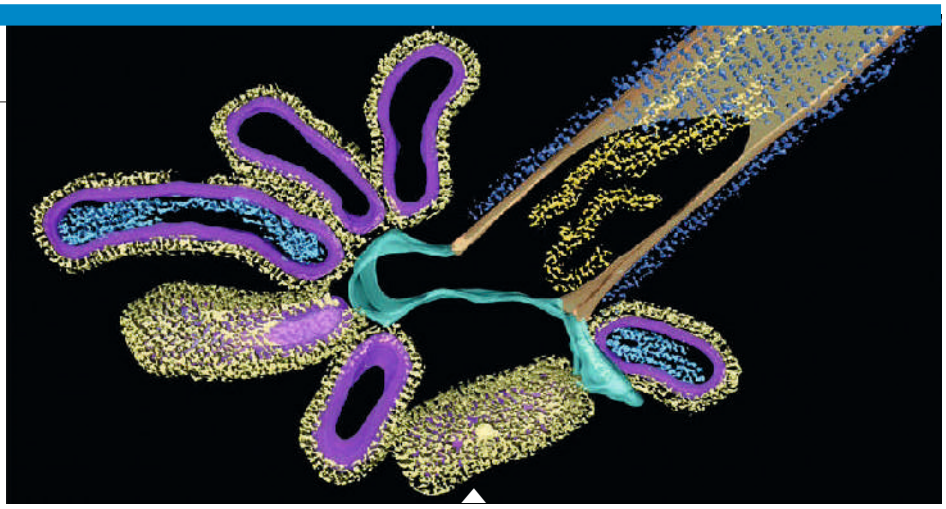
VOISIN/PHANIE VIA AFP

Plus le bébé est placé en contact direct avec sa mère, meilleur est son développement.

Le « peau à peau » dope le cerveau des prématurés

NÉONATALOGIE Sortir un bébé prématuré de sa couveuse et le placer une heure dans les bras de sa mère, peau contre peau, rétablit le développement des connexions neuronales dans son cortex cérébral, selon une étude. L'imagerie EEG révèle que ce contact répété quatre fois par semaine permettrait même à l'enfant de retrouver une activité cérébrale comparable à celle qu'il aurait eue en étant né à terme. **P. K.**

SOURCE : PAULIINA YRYÖLÄ, UNIVERSITÉ D'HELSINKI, FINLANDE.



JOANNE HANEY ET AL.

Les structures moléculaires du VRS (orange, bleu) se sont mêlées à celles de la grippe (turquoise, violet, jaune).

Grippe et bronchiolite s'hybrident dans une cellule

Pour la première fois, les deux virus ont fusionné.

Au cours d'expériences en laboratoire sur des cellules infectées, des scientifiques ont identifié un virus hybride, composé d'une particule virale de la grippe A et d'une autre du virus respiratoire syncytial (VRS) — qui cause les bronchiolites. Si les médecins savaient que l'on peut être infecté par ces deux virus en même temps, c'est la première fois qu'on les retrouve ainsi « fusionnés », et dans la même cellule. *« En temps normal, les virus entrent en compétition. Un seul des deux infecte la cellule, car la réponse antivirale déclenchée par une cellule infectée empêche l'entrée du second »*, explique Pablo Murcia, virologue à l'université de Glasgow (Écosse), coauteur de l'étude publiée dans *Nature Microbiology*. Mais pas ici, où la microscopie cryo-électronique révèle que les structures moléculaires — membrane, génome, protéines — sont partagées. Plus inquiétant : une fois formée, la chimère virale peut toujours infecter les cellules alentour, y compris celles que les deux virus respiratoires n'atteignaient pas avant. **C. L.**

Même le sens du toucher devient virtuel

BIO-INFORMATIQUE Des ingénieurs ont mis au point un dispositif de retour tactile imitant la sensation du toucher par microstimulations électriques, avec une résolution spatiale inédite de 76 points par cm² de peau. Ces actionneurs électrotactiles ont été testés avec succès chez des non-voyants sur une méthode de lecture en braille simplifié ; mais aussi pour reproduire des sensations en réalité virtuelle (caresser un chat, etc.), ou renforcer le toucher atténué par des gants trop épais. **H. J.**

SOURCE : WEIKANG LIN, UNIVERSITÉ HONG KONG, CHINE.

ROBOTICS X LAB ET CITY UNIVERSITY OF HONG KONG

Le dispositif électrotactile a permis à des aveugles de lire du braille simplifié.

Le cœur bioartificiel Carmat de retour en Europe

CARDIOLOGIE L'entreprise française Carmat a annoncé avoir obtenu les autorisations pour reprendre les implantations de son cœur bioartificiel Aeson en Europe, après une interruption fin 2021 due à des défauts de qualité sur deux composants distincts de la prothèse. Après sa première commercialisation en juillet 2021, cinq personnes en insuffisance cardiaque terminale en Allemagne et deux en Italie avaient reçu l'organe artificiel. **H. J.**

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.
Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

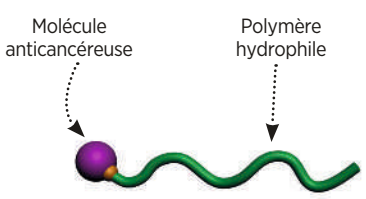
Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

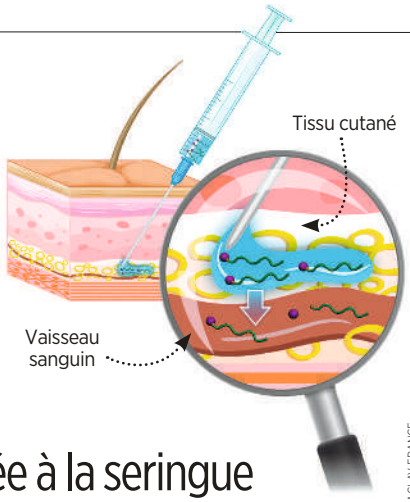
Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA1122



En liant un polymère hydrophile à l'anticancéreux, la chimiothérapie a pu être injectée en sous-cutané et rejoindre le sang.



JULIEN NICOLAS, INSTITUT GALIEN PARIS-SACLAY, FRANCE

Une chimiothérapie administrée à la seringue

CANCÉROLOGIE Une équipe de l'institut Galien Paris-Saclay a administré une chimiothérapie à des souris en l'injectant directement sous la peau à l'aide d'une simple seringue. Une petite prouesse : en principe, les propriétés hydrophobes des molécules cancéreuses bloquent leur migration à travers le tissu sous-cutané jusqu'aux vaisseaux sanguins et obligent à les injecter par voie intraveineuse. Mais en liant un polymère hydrophile et biocompatible aux molécules de chimiothérapie, les scientifiques ont pu passer par la peau. **M. G.**

L'ADN humain regorge de virus anciens

GÉNOMIQUE Les virus sont omniprésents dans notre ADN, révèle une étude. En effet, des gènes de rétrovirus humains s'étant peu à peu intégrés dans le génome de nos aïeux lors d'infections passées ont été retrouvés dans chacun des 13 000 échantillons génétiques provenant de l'autopsie de 948 personnes. Bien qu'ils ne soient plus infectieux, certains de ces gènes sont encore intacts et pourraient être liés à des processus tumoraux. **H. R.**

SOURCE : AIDAN BURN, UNIVERSITÉ TUFTS, BOSTON, ÉTATS-UNIS

FRED TANNEAU / AFP

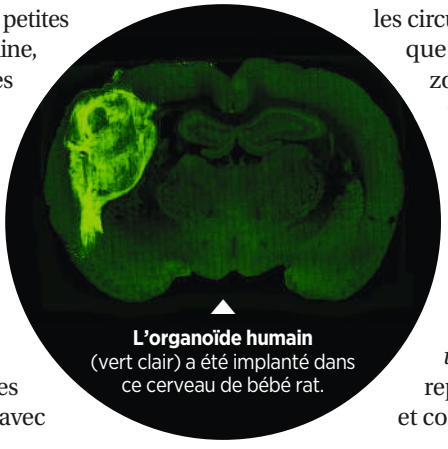
Le sang de ver marin autorisé pour la greffe de rein

TRANSPLANTATION Le produit HEMO2life, de la société bretonne Hemarina, a obtenu un marquage CE pour la greffe de rein. Fabriqué à partir de l'hémoglobine du ver marin commun *Arenicola marina*, 40 fois plus oxygénante que la nôtre, il améliore significativement la conservation des greffons et la survie des patients dans les essais cliniques. Hemarina espère convaincre l'Agence de la biomédecine d'inscrire HEMO2life dans les protocoles de greffe standards. **C. G.**

Des neurones humains ont poussé dans le cerveau de rats

Près d'une centaine de rongeurs ont vécu jusqu'à un an, équipés de ces organoïdes cérébraux.

À l'université Stanford (États-Unis), de petites boules de neurones d'origine humaine, cultivées *in vitro*, ont été implantées avec succès dans le cerveau de rats nouveau-nés. Près d'une centaine de rongeurs ont vécu jusqu'à un an, équipés d'une sorte de cerveau chimérique. Car les organoïdes cérébraux, ces reproductions *in vitro* de tissus du cortex humain à partir de cellules souches, ont non seulement survécu à la greffe, mais se sont développés dans le cerveau des rats, les neurones tissant leurs axones jusqu'à former des connexions de travail avec les circuits neuronaux des rongeurs. À tel point que ces « mini-cerveaux », implantés sur la zone du cortex recevant les signaux des vibrisses, pouvaient être activés électriquement sur demande, en soufflant sur les moustaches des animaux.



L'organoïde humain (vert clair) a été implanté dans ce cerveau de bébé rat.

PASCA LAB, STANFORD UNIVERSITY

L'objectif de cette troublante expérience ? Se servir des rongeurs comme laboratoire *in vivo* pour le développement d'organoïdes cérébraux modèles de maladies neurologiques humaines. *In vitro*, en effet, la croissance de ces petites reproductions biologiques est très limitée et complique l'étude des pathogenèses. **H. J.**

VOISIN/PHANIE VIA AFP

Un acide produit par des bactéries attire les moustiques-tigres.

Certaines peaux sont des aimants à moustiques

DERMATOLOGIE Une série d'expériences montre que les femelles moustiques-tigres (*Aedes albopictus)*, qui transmettent la fièvre jaune, le virus Zika ou le paludisme, sont particulièrement attirées par les odeurs corporelles présentant des taux élevés d'acides carboxyliques, un sous-produit acide fabriqué par des bactéries vivant dans les pores de la peau. **H. J.**

SOURCE : MARIA DE OBALDIA, UNIVERSITÉ ROCKEFELLER, ÉTATS-UNIS

ELLE A DIT

« Pour la première fois en plus de deux décennies, nous avons observé l'an dernier une augmentation du nombre de personnes atteintes de la tuberculose ainsi que de sa forme pharmacorésistante »

Dr Tereza Kasaeva, directrice du Programme mondial de lutte contre la tuberculose de l'OMS qui a révélé qu'en 2021, 10,6 millions de personnes ont développé cette maladie pulmonaire causée par une bactérie, en augmentation de 4,5 % en un an.

SHUTTERSTOCK/PATHDOC

Le choix de reporter une action dépend du cortex cingulaire antérieur.

Dans le cerveau des procrastinateurs

NEUROSCIENCES Remettre à plus tard ce qu'on a à faire est un comportement courant qui se noue dans le cortex cingulaire antérieur du cerveau, chargé notamment des calculs coût-bénéfice pour chaque option possible, montre une étude française menée sur 51 volontaires. À partir de tests et de l'imagerie cérébrale, les scientifiques ont établi un modèle capable de prédire le niveau de procrastination de chaque participant pour remplir un formulaire. **H. J.**

SOURCE : MATHIAS PESSIGLIONE, INSTITUT DU CERVEAU, FRANCE.

www.lesproduitsdumois.com

1337 PHARMA EST LA PREMIÈRE GAMME DE SANTÉ SPÉCIALEMENT CONÇUE POUR LES GAMERS

1337 VIEW est un complément alimentaire destiné à **prendre soin de la santé des yeux**, organes particulièrement sollicités lors d'une exposition prolongée aux écrans. Grâce à ses puissants actifs (Myrtille, Lutéine, Zinc), il **réduit la fatigue et la sécheresse oculaire** tout en **luttant contre les effets néfastes de la lumière bleue des écrans**. ● 26€50 pour une cure de 2 mois. Disponible en pharmacies et sur 1337pharma.com

VITAMINE D POUR VOTRE IMMUNITÉ

Les mini-comprimés **D-immune et D-immune 25 µg** apportent respectivement 50 µg et 25 µg (2000 et 1000 UI*) de Vitamine D, soit 1000% et 500% des apports journaliers recommandés, pour une efficacité optimale.

Un seul mini-comprimé par jour garantit un **apport suffisant en Vitamine D** au quotidien, essentiel pour **maintenir les défenses immunitaires, favoriser la minéralisation osseuse et préserver un bon fonctionnement musculaire. Faire le plein de Vitamine D n'a jamais été aussi simple !** *Unités Internationales

■ En pharmacie boîtes 90 mini-comprimés (3 mois de programme) Sans gélatine. Conviennent aux végétariens.
D-immune ACL 6276968 / D-immune 25 µg ACL 6289633.
New Nordic au 01 85 12 12 12 (tarif local) - www.vitalco.com

NOUVEAU : Reflux, sécrétions, irritations altèrent votre qualité de vie. MUCODISTIM, ENFIN UNE SOLUTION !

Raclements persistants dans la gorge, la Lithocétine® et le GABA agissent sur le pH de l'acidité gastrique et sur la réduction du relâchement du sphincter, permettant ainsi de contribuer à l'élimination des mucosités tout en luttant contre le reflux, l'Inflammation et l'irritation.
La quercétine,pour sa part, aide à combattre lephénomène allergique.
En complément, la Valériane, l'éleuthérocoque, et le magnésium agissent sur le stress et la tension musculaire.
Mucodistim va vous soulager !

A découvrir sur www.audistimpharma.com, en pharmacie et au tel. 05 56 69 13 84

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

Neve, la petite défunte du mésolithique

La sépulture d'un bébé révèle comment les enfants étaient traités avec soin et enterrés avec des ornements transmis sur plusieurs générations.

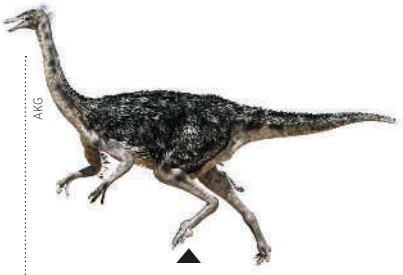
Découverte en 2017 dans une grotte d'Arma Veirana, en Ligurie (Italie), une sépulture contenait les restes d'un nourrisson. Une petite fille, âgée d'environ 6 semaines et surnommée Neve par les chercheurs. Analysés finement par une équipe d'archéologues et d'anthropologues de l'université de Montréal (Canada), les petits ossements, tout comme les coquillages perforés qui les accompagnaient, ont pu livrer, cinq ans après, des informations inédites sur le soin apporté à l'inhumation des bébés à la fin du mésolithique, il y a 10 000 ans. *« Grâce à la photogrammétrie, nous avons créé un modèle 3D du petit squelette — aussi fragile que du beurre,* explique l'archéologue Claudine Gravel-Miguel. *Nous avons notamment pu déterminer la position des perles faites de coquillages* Columbella rustica. » Plus de 70 de ces petites coquilles ont été trouvées, avec quatre gros pendentifs bivalves perforés, d'environ quatre centimètres de long, jamais observés sur d'autres sites préhistoriques.

MAURO CUTRONA

Le nourrisson a été inhumé enveloppé dans une écharpe (dessin ci-dessous) sur laquelle étaient cousus des coquillages (ci-contre).

Une écharpe qui aurait pu servir de « porte-bébé »

Les coquillages devaient être cousus sur une écharpe, probablement faite de cuir, qui enveloppait le corps du bébé à la manière d'un lange. *« En archéothanatologie, la position de certaines connexions osseuses permet d'évaluer si un corps a été enveloppé, et c'est le cas ici »*, assure la chercheuse, qui pousse prudemment l'hypothèse plus loin : du vivant de l'enfant, ce lange pourrait avoir servi d'écharpe de portage, ou « porte-bébé ».
Parmi les très rares tombes de nourrissons de l'époque, c'est la première identifiée comme appartenant à une petite fille. La richesse des ornements en dit long en tout cas sur la place accordée aux nouveau-nés à cette époque, et montre que les petites filles avaient droit aux mêmes sépultures soignées que les enfants de sexe masculin. **M. B.**



AKG

L'ornithomimosaure évoluait il y a 86 millions d'années dans l'est de l'Amérique du Nord.

Un dinosaure autruche de 800 kg

PALÉONTOLOGIE Quelques morceaux d'os, de pattes, de pieds et de vertèbres datés de 86 millions d'années attestent de l'existence d'au moins deux espèces de dinosaures autruches en Appalachia, un territoire qui correspond à la partie est de l'Amérique du Nord. Ces animaux, des ornithomimosaures, se caractérisent par une allure corporelle similaire à celle des gros oiseaux sans ailes modernes. L'examen des os a révélé un spécimen, encore en croissance, d'une masse de 800 kg ! **J. I.**

SOURCE : CHINZORIG TSOGTBAATAR, UNIVERSITÉ DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

L'autre éruption du Vésuve à l'âge du bronze

ARCHÉOLOGIE Deux mille ans avant la destruction de Pompéi, le Vésuve avait déjà enterré un village de l'âge du bronze sur le site d'Afragola, en Campagnie (Italie), à la suite d'une de ses terribles éruptions. Et c'est en automne qu'elle s'est produite, selon l'analyse de traces incroyablement conservées de céréales, noisettes, glands, pommes sauvages et de matériel agricole révélateurs de la saison. **H. J.**

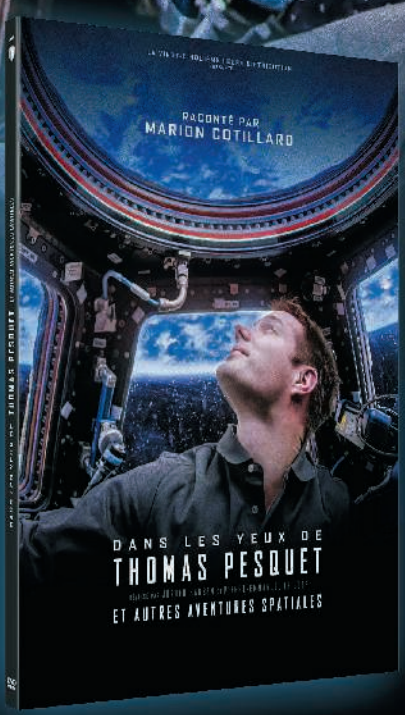
SOURCE : TIZIANA MATARAZZO, UNIVERSITÉ DU CONNECTICUT, ÉTATS-UNIS.

LA VINGT-CINQUIÈME HEURE DISTRIBUTION
PRÉSENTE

"DES IMAGES À COUPER LE SOUFFLE"
FRANCE INFO

"UNE ODE À L'ÉCOLOGIE"
20 MINUTES

RACONTÉ PAR
MARION COTILLARD



DANS LES YEUX DE THOMAS PESQUET

RÉALISÉ PAR JÜRGEN HANSEN ET PIERRE-EMMANUEL LE GOFF

ET AUTRES AVENTURES SPATIALES

INCLUS, LE LIVE EXCLUSIF DU CINÉ-CONCERT

16 LEVERS DE SOLEIL

EN DVD ET VOD LE 6 DÉCEMBRE

SCIENCES AVENIR La Recherche

LA CHRONIQUE SPATIALE

AIR&COSMOS

20 minutes

Artwork affiche : Zfull. Zfull.emilbolle.com

Le palimpseste du Moyen Âge a dévoilé un texte du célèbre astronome grec.

PETER MALIK

Le catalogue des étoiles d'Hipparque se dévoile

Un fragment de ce texte inédit de l'astronome grec de l'Antiquité a été découvert sur un manuscrit du Moyen Âge.

Quelques lignes presque effacées dans le *Codex Climaci Rescriptus*, un manuscrit chrétien du Moyen Âge, représentent les premiers extraits jamais découverts du catalogue d'Hipparque, rédigé par l'astronome grec entre 170 et 120 avant J.-C. C'est la plus ancienne tentative connue de déterminer les positions des étoiles en leur associant des coordonnées numériques. Le *Codex* a été rédigé sur de vieux feuillets, effacés pour être réutilisés. Mais sur certains, l'ancien texte n'a pas totalement disparu et on y a décrypté une référence à la constellation de la Couronne boréale avec les coordonnées de quatre étoiles. C'est l'imagerie multispectrale, une technique qui consiste à mesurer la lumière renvoyée par un objet à différentes longueurs d'onde, qui a révélé ces annotations du Ve ou du VIe siècle. La précision des mesures, au degré près, a permis aux astronomes de remonter jusqu'à l'époque où elles ont été effectuées : vers 129 avant J.-C. Elles démontrent qu'Hipparque mérite bien son titre de « plus grand astronome de l'Antiquité ». **J. I.**

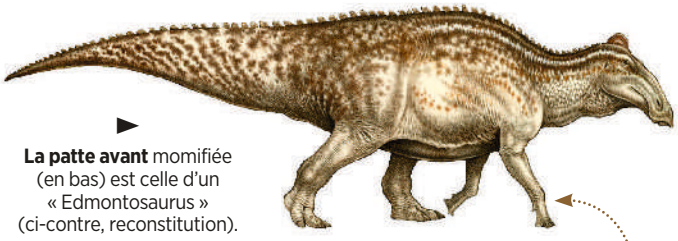
EN DEUX MOTS

ÉVOLUTION Selon l'analyse phylogénétique de plus de 1800 espèces, la communication acoustique ou orale des tortues comme des humains serait apparue chez un ancêtre commun il y a 407 millions d'années. **NAUFRAGE** L'épave du *S. S. Mesaba*, qui avait alerté le *Titanic* de la présence d'icebergs le soir de son naufrage, vient d'être retrouvée en mer d'Irlande. **SACRIFICE** Des microfibres retrouvées sur les dents de victimes de sacrifices mayas suggèrent qu'elles étaient bâillonnées avant d'être suppliciées.

La maternité se lit dans les os

ANTHROPOLOGIE Les mères ont des os moins concentrés en magnésium, calcium et phosphore que les autres femelles primates, selon une étude qui montre ainsi que la reproduction modifie la composition du squelette de façon permanente. Un résultat surprenant qui devrait être transposable à notre espèce et permettra de connaître le statut parental des squelettes féminins. **C. G.**

SOURCE : PAOLA CERRITO, UNIVERSITÉ DE NEW YORK, ÉTATS-UNIS.



La patte avant momifiée (en bas) est celle d'un « Edmontosaurus » (ci-contre, reconstitution).

Découverte d'un dinosaure « momifié »

PALÉONTOLOGIE **Le fossile d'un *Edmontosaurus*, espèce de dinosaure à bec de canard, a été retrouvé avec de la peau « momifiée ». La dépouille a pourtant été exposée à l'air libre longtemps après sa mort, et a même été en partie consommée, probablement par un crocodile. Loin des conditions qu'on pensait requises pour « momifier » un dinosaure vieux de 67 millions d'années, à savoir un enfouissement rapide ou un climat aride.** **F. H. N.**

SOURCE : STÉPHANIE DRUMHELLER, UNIVERSITÉ DU TENNESSEE, ÉTATS-UNIS.

NATEE PUTTAPIPAT, CC-BY 4.0

Ce petit cube d'os permettait à son détenteur de gagner au jeu.

Un dé truqué au mercure

ARCHÉOLOGIE Un dé à jouer de tricheur a été retrouvé dans l'enceinte de la villa gallo-romaine de Mageroy, située à Habay (Belgique). Creusé et rempli d'une petite quantité de mercure, le dé en os permettait à son propriétaire de forcer la valeur de son choix à une époque où les jeux de dés étaient très populaires. Lors d'une fouille organisée pendant une sortie scolaire, un enfant a brisé par inadvertance le dé, révélant le subterfuge. **M. B.**

SOURCE : THOMAS DANIAUX, UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE.

THOMAS DANIAUX/UNIVERSITÉ DE FRIBOURG/ERC LOCUS LUDI

À peine sevré, Neandertal était déjà amateur de viande

PALÉOANTHROPOLOGIE Tout juste sevré, ce petit néandertalien vieux de 43 000 à 100 000 ans était nourri largement de viande. C'est ce que montre une nouvelle technique d'analyse des isotopes de zinc appliquée à l'émail d'une des dents retrouvées sur le site de Gabasa, en Espagne. Reste à confirmer la validité de cette méthode sur d'autres individus, y compris chez des australopithèques, pour lesquels on ignore toujours la place qu'avait la viande dans leur alimentation. **R. M.**

SOURCE : KLERVIA JAOUEN, CNRS, FRANCE.

LOURDES MONTES

La molaire de l'enfant contenait des traces de chair de gibier.

IL A DIT

« Nous sommes certains de pouvoir annoncer la découverte de la momie de Néfertiti dans un mois, tout au plus, en même temps que les derniers résultats de l'ADN de Toutankhamon »

Zahi Hawass, égyptologue et ancien ministre des Antiquités égyptiennes, promettant la résolution imminente d'une saga vieille de quinze ans qui devrait aboutir à l'identification des restes de cette mystérieuse reine d'Égypte (1370-1333 avant J.-C.), grande épouse royale d'Akhenaton.

Le graffiti du chevalier suisse

ARCHÉOLOGIE Des chercheurs de l'Autorité israélienne des antiquités ont identifié, gravé sur le mur d'un complexe du tombeau du roi David à Jérusalem, le nom et le blason de famille du chevalier suisse Adrian von Bubenberg, venu en pèlerinage en Terre sainte en 1466. Invisible à l'œil nu, l'inscription a réapparu grâce à une technique de photographie multispectrale. **H. J.**

MENAHEM KAHANA / AFP

MAURICIO CANTOR - IPGP - CNES - N. STARTER - LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT, JURAJ LIPTÁK

Invisible à l'œil nu, la signature laissée par Adrian von Bubenberg lors de son voyage à Jérusalem a été révélée par la photographie multispectrale.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

DR

PHYSIQUE

De l'économétrie à la théorie du chaos

Physicien éclectique, Yves Rocard (1903-1992) est surtout connu pour avoir renouvelé la physique française après la Seconde Guerre mondiale. Ce qu'on sait moins, c'est qu'il fit une incursion en économétrie mettant en évidence les prémices de ce qu'on appela ensuite la théorie du chaos. Histoire d'un physicien aujourd'hui oublié.
À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/910chaos

ASTRONOMIE

Revivez l'éclipse partielle de Soleil

Une éclipse partielle de Soleil était visible le 25 octobre au-dessus d'une partie de l'hémisphère Nord, dont la France métropolitaine. Vous avez raté le spectacle ? Revivez-le en vidéo sur le site de *Sciences et Avenir*. sciav.fr/910eclipse

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Écoutez les cachalots se parler

Une équipe d'acousticiens a pu enregistrer et identifier pas moins de sept dialectes différents utilisés par les cachalots du Pacifique pour communiquer.
sciav.fr/910cachal

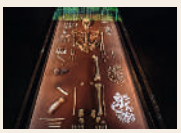
5 minutes

Chute de météorites sur Mars

Le sismomètre de la mission InSight a détecté deux impacts majeurs de météorites sur la planète Rouge, dont l'un a formé un cratère de 150 mètres de large.
sciav.fr/910sismo

10 minutes

Le pouvoir de la Chamane de Bad Dürrenberg



Enquête sur les dernières révélations des archéologues sur les restes de cette femme d'exception inhumée il y a 10 000 ans en Allemagne.
sciav.fr/910chamane

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

La biométrie est-elle bénéfique ou nocive ?

La biométrie est très puissante, mais si elle n'est pas manipulée correctement, elle peut s'avérer très dangereuse. De grands pouvoirs impliquent de grandes responsabilités.

Comment prouver que vous êtes qui vous prétendez être ? Voilà une question fondamentale présente dans toutes nos activités en ligne. Les réponses sont variées : Les mots de passe. Les codes numériques. Et de plus en plus souvent, la biométrie.

La biométrie se définit généralement comme un aspect du corps d'une personne qui lui est propre et très difficile, voire impossible, à reproduire. Si nous connaissons surtout les empreintes digitales et la reconnaissance faciale, Drummond Reed, le directeur des services de confiance d'Avast, précise que la catégorie peut également inclure le scan de la paume de la main, le scan d'ADN, le schéma de frappe, la démarche, voire une photographie.

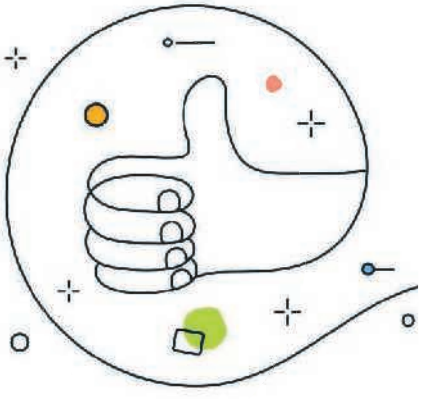
« En règle générale, les données biométriques sont extrêmement difficiles, voire impossibles à modifier », explique M. Reed. *« Vous pouvez changer de nom ou même de numéro de sécurité sociale, mais vous ne pouvez pas changer votre ADN, par exemple. »*

Toutefois, afin de pouvoir être utilisées à des fins d'identification en ligne, vos données biométriques doivent être numérisées. Lorsque vous prenez une empreinte biométrique (une empreinte digitale, par exemple), celle-ci est transformée en « modèle biométrique ». Ce modèle est ensuite comparé à votre biométrie physique réelle afin de vérifier que vous êtes bien la personne que vous prétendez être ; puis vous êtes autorisé à accéder au service auquel vous souhaitez accéder.

À titre d'exemple, M. Reed cite un modèle biométrique très analogique : un permis de conduire. Votre permis de conduire contient des informations biométriques vous concernant, notamment votre photo, votre taille, votre poids et la couleur de vos yeux, ainsi que d'autres informations comme votre date de naissance, votre adresse et le type de véhicule que vous êtes autorisé à conduire.

Lorsque quelqu'un le consulte, il peut comparer ce qui figure sur le permis à la personne qu'il a en face de lui, c'est-à-dire vous. Si vos données biométriques (photo, taille, poids, couleur des yeux) correspondent à votre modèle biométrique (votre permis), on semble logique que les autres informations vous concernant (adresse, date de naissance, etc.) sont également exactes.

Dans le cas de la biométrie numérique, le modèle biométrique n'est pas quelque chose que le « titulaire » de la biométrie peut voir ou tenir entre ses mains. Il est stocké soit directement sur un appareil, comme c'est le cas avec les produits Apple, soit dans une base de données sur le cloud ou un autre serveur.



Quels sont les inconvénients de l'utilisation de la biométrie en ligne ?

De nombreux utilisateurs s'inquiètent de la collecte et de l'utilisation de leurs données biométriques, ce qui se comprend. Après tout, si vous pouvez changer de mot de passe, vous ne pouvez pas changer d'empreinte digitale. (Du moins, pas facilement ni sans beaucoup d'argent). Ainsi, si vos données biométriques sont compromises, il est fort possible qu'elles soient utilisées contre vous ; et vous n'aurez que très peu de recours.

Autres problèmes liés à la biométrie : l'abus qu'en font les gouvernements et leurs représentants. Par exemple, dans certains états des États-Unis, la police a le droit de vous obliger à débloquer votre téléphone à l'aide de votre empreinte digitale ou par reconnaissance faciale, mais elle ne peut pas vous forcer à saisir votre code d'accès.

En Chine, le gouvernement recueille un volume considérable de données biométriques allant du scan du visage à la reconnaissance vocale, en passant par la « reconnaissance de la démarche » (qui identifie les personnes par leur style et leur rythme de marche uniques). Lors des manifestations pour la démocratie de 2014 à Hong Kong, les manifestants portaient des parapluies, des masques et des casques pour protéger leur identité de la surveillance du gouvernement. Et lorsque l'armée américaine a quitté l'Afghanistan, elle a laissé derrière elle les données biométriques des Afghans qu'elle avait recueillies afin d'identifier les terroristes. Ces informations sont désormais entre les mains des talibans et pourraient être utilisées pour alimenter les représailles contre ceux qui ont participé aux opérations américaines.

Quels sont sont les avantages de l'utilisation de la biométrie en ligne ?

Les inconvénients de l'utilisation de la biométrie en ligne sont évidents, mais elle offre aussi des avantages majeurs. Les données biométriques ne sont pas

seulement pratiques, elles sont aussi très difficiles à détourner. Même si des bases de données biométriques ont été piratées, il est important de souligner que la technologie nécessaire pour exploiter ces informations biométriques volées n'est pas disponible, ou du moins pas encore.

Mais tout comme les criminels sont parvenus à contourner tous les autres systèmes d'authentification créés jusqu'à présent, ils trouveront certainement aussi le moyen de déjouer la biométrie. C'est pourquoi il est important que le monde de la cybersécurité agisse de manière offensive et garde une longueur d'avance sur les cybercriminels, et ce, grâce à nos solutions de sécurité.

M. Reed affirme que le déploiement de la biométrie par Apple est un bon exemple de la manière de procéder tout en préservant la vie privée. La société conserve votre modèle biométrique sur l'appareil même, et non dans une base de données distante. Autrement dit, il ne risque pas d'être volé si, par exemple, une base de données est piratée.

Parce qu'elles ne nous obligent pas à mémoriser quoi que ce soit, les données biométriques sont également bien meilleures que la méthode de vérification qui prévaut actuellement : les mots de passe. Mais à l'instar des mots de passe, les données biométriques peuvent être hachées (ou chiffrées, pour que les voleurs ne puissent pas les lire), ce qui signifie qu'elles peuvent être enregistrées dans une base de données. *« Une base de données biométriques n'est pas une mauvaise chose en soi, mais très peu de personnes dans le monde savent comment s'y prendre en toute sécurité »*, explique M. Reed. *« C'est pour cela qu'on ne voit pas toujours les bases de données biométriques comme une très bonne idée. Dans le domaine de la protection de la vie privée, il s'agit d'un outil à utiliser avec beaucoup, beaucoup de précautions. Dans tous les projets auxquels j'ai participé et qui impliquaient des données biométriques, l'objectif était de ne jamais les intégrer à une base de données distante. »*

M. Reed souligne aussi que la force de la biométrie pour la vérification en ligne (le fait qu'elle soit réellement unique à l'individu) lui confère un très haut niveau d'assurance. Et, même si vos données biométriques vous sont propres, elles peuvent être anonymes. *« Il s'agit simplement de faire correspondre l'empreinte digitale, le scan du visage, etc., au modèle »*, explique M. Reed. *« Cette méthode peut être compatible avec la protection de la vie privée. Presque rien d'autre n'est aussi adapté : c'est assez puissant. »*

La biométrie est-elle bénéfique ou nocive ?

Ce serait formidable si nous pouvions facilement classer toute chose comme « bénéfique » ou « nocive », mais presque tout se situe en fait dans la zone grise entre les deux. Cela inclut l'utilisation de la biométrie pour les vérifications en ligne. *« Je suis très favorable à la biométrie, mais seulement si elle est utilisée correctement »*, déclare M. Reed. *« Je fais le parallèle avec la manipulation de substances radioactives. Celles-ci sont très puissantes, mais si elles ne sont pas manipulées correctement, elles s'avèrent surtout très dangereuses. De grands pouvoirs impliquent de grandes responsabilités. »*

Téléchargez Avast One gratuitement sur votre PC sur **avast.com/sciences**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

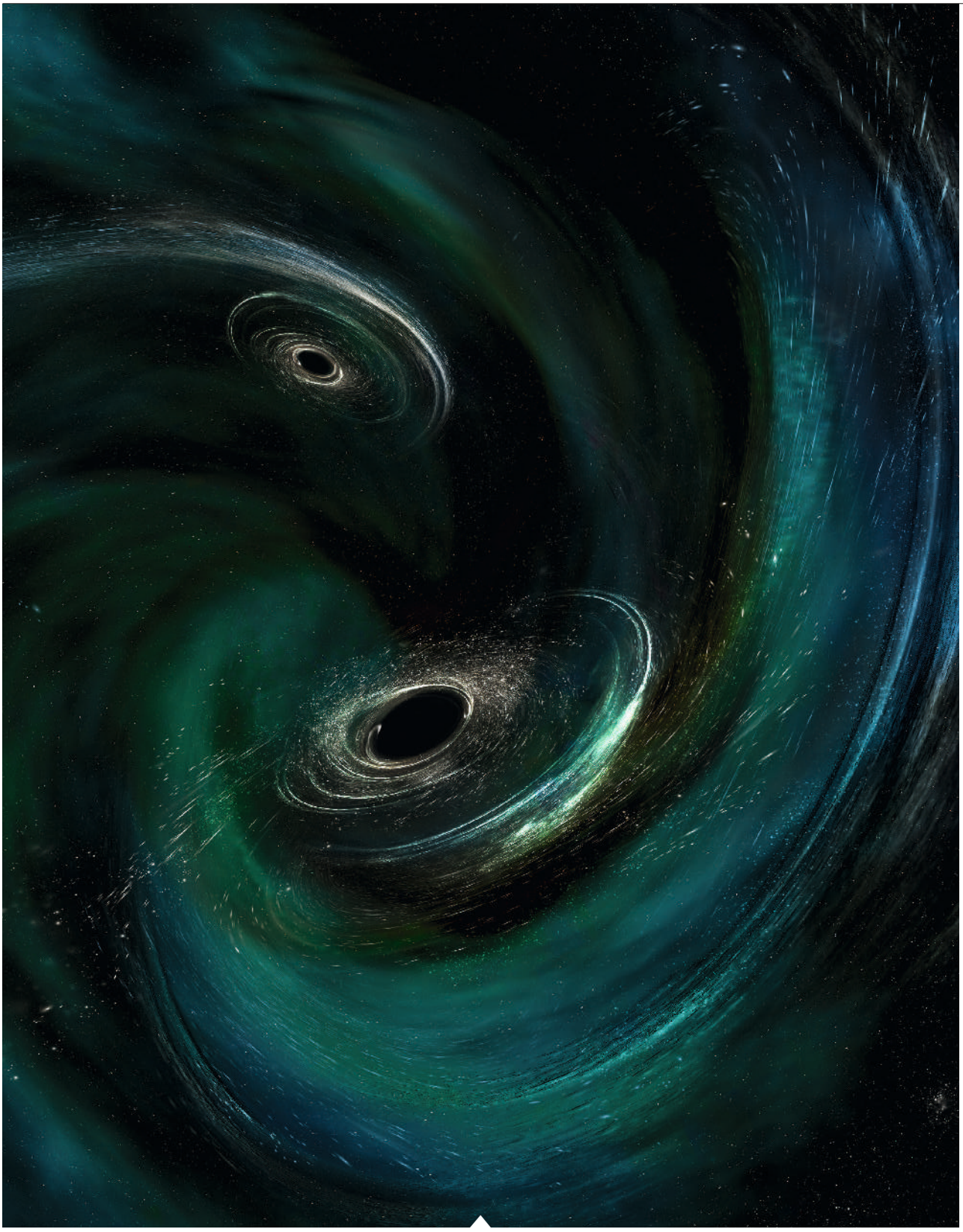
+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

LE TOUT 100 % GRATUIT !

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile



LIGO/CALTECH/MIT/SONOMA STATE (AURORE SIMONNET)

Deux trous noirs spiralent l'un autour de l'autre jusqu'à leur collision à 3 milliards d'années-lumière de nous (illustration). Un événement dont les ondes gravitationnelles ont été détectées le 4 janvier 2017 par les observatoires européen Virgo et américain Ligo.

Trous noirs

Mystère aux confins du Système solaire

Quelque chose nous échappe dans la composition du Système solaire au-delà de Neptune. Impossible d'expliquer les orbites de certains objets sans envisager la présence d'un corps massif non identifié. Pour deux astrophysiciens, il pourrait s'agir d'un astre longtemps demeuré hypothétique : un trou noir primordial.

Par Sylvie Rouat @srouat1

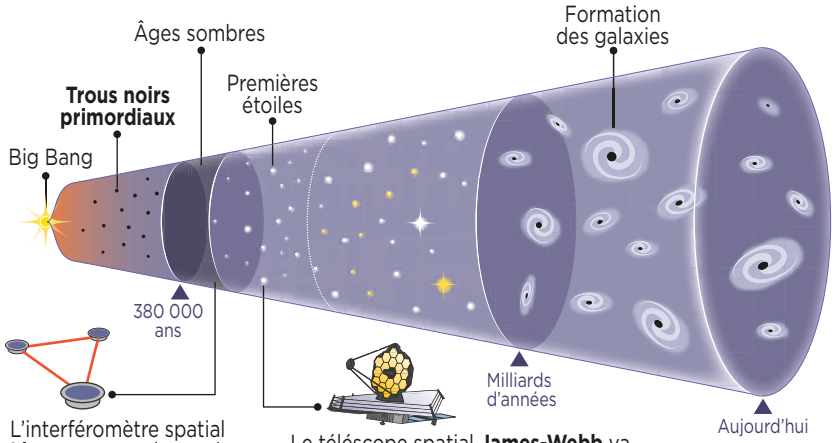
Notre système solaire abrite-t-il, dans ses régions les plus lointaines, un trou noir de la taille d'une balle de tennis ? C'est en tout cas l'hypothèse très sérieusement avancée par des chercheurs anglais et américain pour expliquer les nombreux phénomènes incompris dans la ceinture de Kuiper. Cette vaste région de millions de corps glacés s'étend au-delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 55 unités astronomiques (UA, une unité astronomique correspondant à la distance Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). Le plus connu de ces objets transneptuniens est la planète naine Pluton, découverte en 1930. Mais depuis 1992, d'autres planétoïdes baptisés Éris, Sedna, Hauméa, Makémaké… y ont été repérés. Et tandis que les découvertes s'accumulaient, l'incompréhension des scientifiques augmentait : les modèles peinent en effet à expliquer certaines orbites excentriques telle celle de Sedna, le regroupement de certains objets ou encore des trajectoires perpendiculaires au disque planétaire. Toutes ces anomalies deviennent plus prévisibles si l'on insère dans les modèles un corps massif à la frontière externe de la ceinture de Kuiper. Dès 2014, des scientifiques américains de la Carnegie Institution à Washington (États-Unis) ont ainsi émis l'hypothèse de la présence d'une cinquième planète géante de cinq à dix fois la masse de la Terre, croisant à une distance de 300 à 1000 UA. Baptisée planète Neuf, ce corps céleste aurait pu être éjecté du système solaire interne au début de sa formation.

Ou être une planète errante capturée par l'attraction gravitationnelle de notre étoile. Mais à ce jour, nulle trace d'une neuvième planète n'a pu être trouvée. Cette invisibilité peut s'expliquer si ce corps est en réalité non pas une planète mais un trou noir, astre par définition furtif car n'émettant aucun rayonnement… Telle est l'hypothèse des astrophysiciens Jakub Scholtz de l'université de Durham, (Royaume-Uni) et James Unwin, de l'université de l'Illinois à Chicago (États-Unis). Un trou noir de cinq fois la masse de la Terre aurait, par exemple, un diamètre de la longueur d'un index, ce qui le rend presque indétectable. Selon les chercheurs, l'existence d'un tel objet pourrait également expliquer un ensemble d'anomalies gravitationnelles observées par Ogle (Optical Gravitational Lensing Experiment), l'expérience de l'université de Varsovie (Pologne) de détection de microlentilles gravitationnelles.

Deux interprétations possibles pour des anomalies détectées

Ces phénomènes de courbure de la lumière se produisent lorsqu'un objet très massif au premier plan déforme et amplifie l'éclat des astres situés derrière lui. « *L'expérience Ogle a enregistré six événements de microlentilles ultracourts, se produisant sur des délais de 0,1 à 0,3 jour,* expliquent Jakub Scholtz et James Unwin. *Ces événements correspondent à l'effet lentille d'objets de masse comprise entre 0,5 à 20 fois celle de la Terre. Ils peuvent être interprétés comme étant générés par une population inconnue de planètes errantes ou de trous noirs primordiaux.* » Selon les chercheurs, les deux hypothèses sont tout aussi probables.

Deux instruments vont sonder les débuts de l'Univers



BRUNO BOURGEOIS

Mais qu'est ce qui distingue un trou noir primordial d'un trou noir classique ? Son origine. Le trou noir standard — dit astrophysique — résulte de la mort d'une étoile. En fin de vie, lorsque celle-ci a consommé tout son matériel radioactif, la pression de radiation qui dilatait son atmosphère diminue. La force gravitationnelle prend alors le dessus en son sein et, si l'étoile a au moins une masse de 1,4 fois celle du Soleil, elle s'effondre sur elle-même pour former un trou noir. La majeure partie des trous noirs stellaires ainsi créés affichent une masse comprise entre 5 à 10 fois celle du Soleil. Ensuite, ils grossissent en accrétant la matière environnante. Mais les modèles montrent que même si un tel astre évolue dans un milieu riche en étoiles et en gaz, il ne pourrait dépasser mille masses solaires compte tenu du temps écoulé depuis le Big Bang.

Comment expliquer alors les trous noirs supermassifs, que l'on observe dans à peu près toutes les grandes galaxies y compris la Voie lactée, et qui atteignent des millions voire des milliards de fois la masse de notre étoile ? L'existence de trous noirs dits primordiaux, théorisée en 1971 par les astrophysiciens britanniques Stephen Hawking et Bernard Carr, permet de résoudre cette énigme. Du moins sur le papier. « *Cette population de trous noirs se serait formée quelques fractions de seconde après le Big Bang,* explique Vincent Vennin, chercheur au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris. *L'Univers était alors constitué d'un plasma, au sein duquel des fluctuations quantiques ont formé des grumeaux, qui ont ensuite donné naissance aux étoiles et aux galaxies… Des grumeaux plus denses auraient également pu s'effondrer en trous noirs. À la différence de leurs cousins astrophysiques, ceux-ci n'ont pas de contrainte de masse : des trous noirs d'un gramme ou d'un kilo auraient pu se former ainsi juste après l'inflation.* » Soit à la fin de la phase d'expansion rapide qui aurait permis à l'Univers de s'étendre considérablement, entre 10^{-36} et 10^{-33} seconde après le Big Bang.

VINCENT VENNIN

« Pendant longtemps les trous noirs ont été considérés comme des objets exotiques. Les primordiaux ajoutaient de l'exotisme à l'exotique »

Vincent Vennin, chercheur au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris

SCÉNARIO

La traversée de la Terre par un microtrou noir

Notre planète risque-t-elle d'être avalée par un trou noir primordial en goguette dans le Système solaire ? Une étude menée par Sohrab Rahvar, directeur du département cosmologie et gravitation à l'université Sharif de Téhéran (Iran), montre que la probabilité d'une collision de la Terre avec un trou noir de la masse d'un astéroïde est d'une fois par milliard d'années, soit un potentiel de quatre rencontres cataclysmiques au cours de la vie de notre planète. Pour les trous noirs plus massifs, la probabilité est en revanche quasi nulle. Le chercheur a ensuite envisagé plusieurs scénarios de rencontre avec un trou noir de 10^{12} kg condensé dans un volume microscopique, donc indétectable. Animé d'une grande énergie cinétique, le trou noir traverserait la Terre et serait alors ralenti par des frottements avec les roches du manteau et le phénomène d'accrétion de la matière au cours de ce passage. Si sa vitesse demeurait suffisante, il continuerait son chemin et traverserait la Terre, laissant derrière lui un tunnel cylindrique de 10 cm de rayon, rapidement comblé. *« Une telle traversée générerait une sorte de petit tremblement de terre,* note Sébastien Clesse, physicien à l'Université libre de Bruxelles (Belgique). *Mais il serait difficile de le distinguer d'un séisme géologique. »* Si, en revanche, le trou noir est suffisamment ralenti par ce passage dans le manteau, il pourrait sombrer en spirale jusqu'au noyau terrestre.

ESO/M.KORNMESSER

La probabilité qu'un trou noir microscopique percute la Terre est de l'ordre d'une fois par milliard d'années.

Là, il absorberait la matière alentour, grossirait inexorablement et, à ce stade, la Terre serait condamnée à disparaître en son sein. Par chance, l'étude de Sohrab Rahvar montre que les trous noirs primordiaux pouvant constituer le halo de notre galaxie devraient avoir des vitesses de l'ordre de 200 km/s, ce qui privilégie une traversée rapide, sans trop de conséquences. Poussant ce scénario plus loin, le scientifique s'est interrogé sur l'impact d'une collision d'un trou noir de la taille d'un atome avec le corps humain. Un tel objet nous traverserait en seulement 0,01 milliseconde. Mais ce passage éclair nous ferait rétrécir de plusieurs centimètres et l'énergie libérée par l'ingestion de matière humaine brûlerait nos chairs sur son passage, nous conduisant à une mort immédiate.

La physique explique qu'il y a une relation linéaire entre la masse des trous noirs primordiaux et le temps écoulé depuis le Big Bang : les trous noirs créés à la fin de l'inflation auraient une masse d'un gramme, alors que ceux nés une seconde après le début de l'Univers afficheraient une masse de 100 000 fois celle du Soleil ! *« Les fluctuations quantiques sont apparues de manière aléatoire et homogène,* indique Vincent Vennin. *Cela signifie que les trous noirs primordiaux sont d'abord répartis de manière uniforme. Mais ensuite, ils s'attirent les uns les autres, se regroupent en paquets, fusionnent. »* Un processus évolutif qui, à l'échelle de l'âge de l'Univers, aurait permis d'atteindre les masses affichées par les trous noirs supermassifs ancrés au cœur des grandes galaxies.
Si l'Univers primordial a effectivement engendré des cohortes de trous noirs de toutes tailles, cela pourrait aussi expliquer un autre mystère de la cosmologie, celui de la « matière noire », qui représenterait 85 % de toute la matière de l'Univers. Car la matière visible n'explique pas à elle seule la cohérence gravitationnelle des galaxies en rotation, dont les étoiles, selon les lois de la physique, devraient être éparpillées par la force centrifuge. Une substance de nature inconnue semble donc se concentrer dans le halo externe des galaxies, cette région frontière qui s'étend au-delà des derniers hameaux de vieilles étoiles et d'amas glo-

THÉORIE

Quand les trous noirs s'évaporent

Visualisation à l'échelle 1 d'un trou noir de quatre masses terrestres. Celui qui graviterait dans le Système solaire serait à peine plus gros.

À chaque instant se créent dans l'Univers des paires de particules et d'antiparticules qui s'annihilent immédiatement. Mais à la frontière d'un trou noir, les choses peuvent se passer différemment. Cet astre dense courbe en effet si extrêmement l'espace-temps qu'il crée un horizon. Lorsqu'une paire particule-antiparticule se crée à cette limite, il se peut qu'un membre du couple soit absorbé par le trou noir, tandis que l'autre membre s'en éloigne. L'annihilation n'étant plus possible, le trou noir émet ainsi un rayonnement, qui lui fait progressivement perdre de la masse.

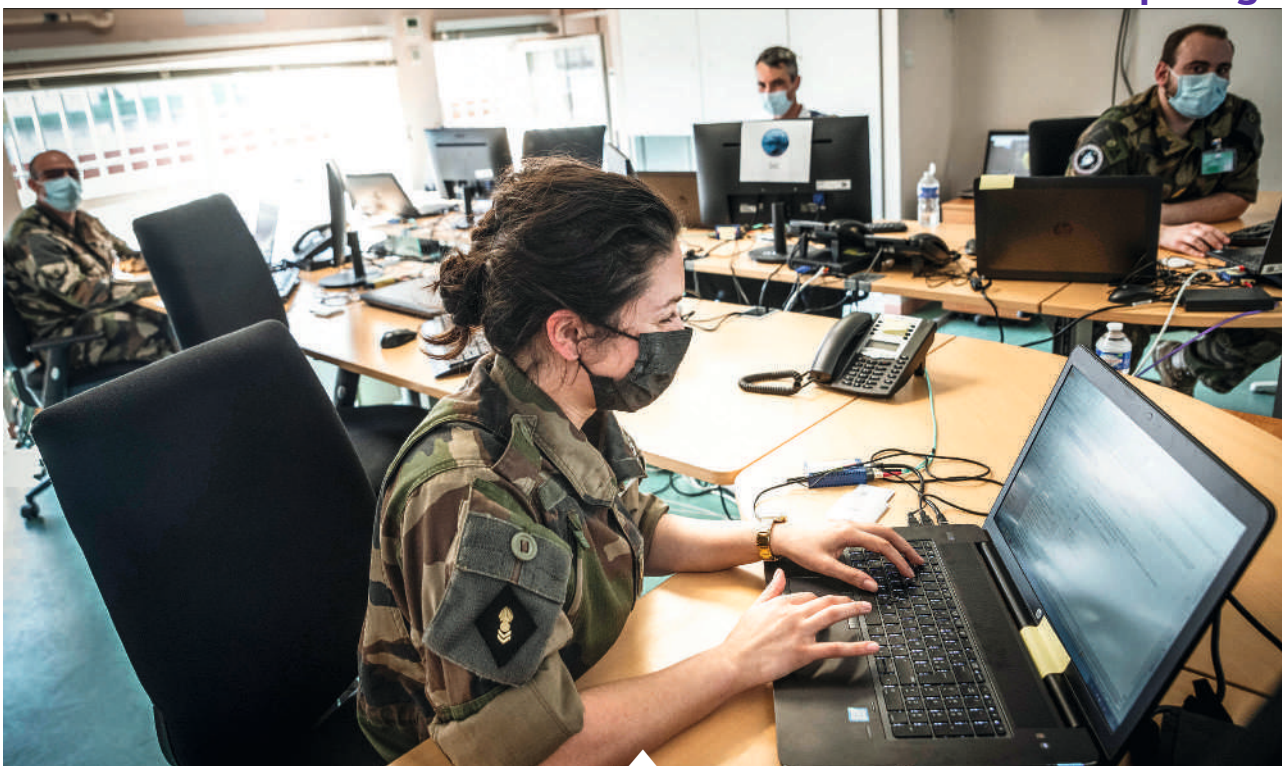
Ce phénomène d'évaporation est peu perceptible pour un trou noir très massif, mais peut conduire à la disparition complète des trous noirs plus légers. Depuis le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années, tous les trous noirs primordiaux d'une masse inférieure à 10^{11} kg se sont déjà évaporés. Les trous noirs les moins massifs subsistant aujourd'hui (10^{12} kg) ont la masse d'une montagne comprimée dans le volume d'un noyau atomique d'hydrogène ! *« C'est pour tester ce phénomène d'évaporation — appelé "rayonnement de Hawking" — que le physicien britannique Stephen Hawking a théorisé l'existence de trous primordiaux de très petite masse »*, note Sébastien Clesse, physicien à l'Université libre de Bruxelles (Belgique). Observer l'évaporation de trous noirs serait un moyen solide de prouver l'existence de trous noirs primordiaux.

bulaires relégués en banlieue galactique. L'importance de la matière noire censée se concentrer dans ce halo permet d'expliquer la vitesse de rotation des galaxies. Mais de quoi est-elle faite ? De trous noirs primordiaux, ont proposé plusieurs physiciens dans les années 1990. Cette hypothèse a ensuite été abandonnée au début des années 2000, au profit notamment de recherches de particules exotiques. Une quête demeurée vaine à ce jour.

Aussi, lorsqu'en 2015 les observatoires Ligo et Virgo, respectivement situés aux États-Unis et en Italie, détectent pour la première fois des ondes gravitationnelles engendrées par la fusion de deux trous noirs, les primordiaux connaissent un regain d'intérêt. *« Pendant longtemps, les trous noirs ont été considérés comme des objets exotiques, et les trous noirs primordiaux ajoutaient de l'exotisme à l'exotique,* souligne Vincent Vennin. *Maintenant que nous sommes parvenus à prouver leur existence, nous ne savons pas si nous nous trouvons en présence de trous noirs astrophysiques ou primordiaux.* » Aujourd'hui, plus de 100 trous noirs ont pu être caractérisés grâce aux ondes énergétiques émises lors de leur fusion et ayant navigué jusqu'à nous sur la trame de l'espace-temps, comme des vagues à la surface de l'eau. Mais ces objets intriguent les scientifiques. *« Nous nous attendions à trouver des trous noirs de 10 à 15 fois la masse du soleil,* explique Sébastien Clesse, physicien à l'Université libre de Bruxelles (Belgique). *Or, nous détectons des objets de 30, 40 et jusqu'à 100 masses solaires, ce qui est interdit par les modèles de supernovæ. Et le spin — la rotation intrinsèque — des trous noirs observés est proche de zéro, ce que l'on attend d'un trou noir primordial… »*

Les germes des premières étoiles et galaxies

Le seul moyen d'en avoir le cœur net serait d'observer un trou noir d'une masse inférieure à 1,4 fois celle du Soleil, un objet impossible à créer à partir d'une étoile. Les instruments actuels ne sont pas assez sensibles et il faut attendre pour cela la mise en service, prévue pour 2034, de l'interféromètre laser spatial européen Lisa. Par ailleurs, les trous noirs formés dans les premières secondes de l'Univers ont pu être les germes des premières étoiles et galaxies. Ces « moteurs » gravitationnels auraient ainsi accéléré l'effondrement des nuages de poussières et de gaz emplissant l'Univers durant les premiers millions d'années après le Big Bang. Si tel est le cas, ces épisodes pourraient être visualisés par le nouveau télescope spatial James-Webb (JWST) de la Nasa, en orbite depuis le 25 décembre 2021. Quant à notre tout petit trou noir du Système solaire, il pourrait trahir sa présence s'il ingère à l'avenir un peu de matière, un événement hélas rare dans ces froides et désertiques régions de la ceinture de Kuiper. ■



JEAN CLAUDE MOSCHETTI/REA

Le Groupement de la cyberdéfense des armées, installé près de Rennes (Ille-et-Vilaine), assure la protection des systèmes d'information du ministère des Armées et élabore la lutte informatique offensive de la France.

La cyberguerre a déjà commencé

Notre monde, géré par les réseaux informatiques et truffé d'équipements interconnectés, est devenu le théâtre de combats d'un genre particulier, où cybercrime et interventions étatiques se mêlent. Quand les virus informatiques et les logiciels espions deviennent des armes de guerre. Reportage près de Rennes, au cœur de la cyberdéfense française.

Le bâtiment jaune pâle de 120 mètres de long, massif, domine la base militaire du quartier Stephant à Saint-Jacques-de-la-Lande, en périphérie de Rennes (Ille-et-Vilaine). Abritant salles de serveurs et plateaux techniques, il a été inauguré en octobre 2019 pour héberger le Groupement de la cyberdéfense des armées (GCA), la composante opérationnelle du Commandement de la cyberdéfense, ou Comcyber. C'est là que sont analysées et détectées les menaces visant les systèmes d'information du ministère de la Défense et des armées françaises. C'est de là que ces derniers sont protégés. De là, également, que sont surveillées des opérations d'influence, utilisant notamment les réseaux sociaux, susceptibles de mettre en danger des forces françaises sur le terrain. Et c'est en ces lieux que s'élabore la lutte informatique offensive de la France. En clair : élaboration de virus, logiciels espions, riposte à une agression numérique. Ces opérations font l'objet d'une doctrine militaire officielle depuis janvier 2019, dont les modalités restent confidentielles. Actuellement en plein

15 ans de cyberguerre

Russie, Israël, Corée du Nord… Certains États n'hésitent pas à attaquer les systèmes informatiques d'autres pays ou de sociétés. Exemples.

2008-2010

Stuxnet, un virus informatique sophistiqué, provoque la destruction de centrifugeuses d'enrichissement d'uranium à Natanz, en Iran. Il a été développé pendant trois ans par les États-Unis et Israël pour stopper le programme nucléaire iranien.

SIPA

Le site nucléaire iranien de Natanz ciblé par un virus informatique.

Décembre 2015

En Ukraine, des coupures d'électricité sont provoquées par un logiciel malveillant envoyé dans les systèmes informatiques de plusieurs centrales. L'attaque est attribuée à la Russie.

Avril 2007

À la suite du déplacement d'une statue célébrant les soldats soviétiques, l'Estonie subit une vague inédite d'attaques par déni de service (envoi de multiples requêtes pour saturer un serveur) sur les sites Internet du Parlement, de ministères, de banques et de médias. Accusée, la Russie a nié en être l'instigatrice.

AFP

Le transfert d'une statue cause une cyberattaque en Estonie.

Novembre 2014

Un groupe nord-coréen pirate Sony Pictures, vole des données et menace les États-Unis d'un attentat pour empêcher la sortie du film *L'Interview qui tue !*, qui tourne en dérision le leader nord-coréen Kim Jong-un.

SIPA

La sortie d'un film provoque le piratage de Sony.

bouleversement, la base a vocation à rassembler d'autres unités de cyberdéfense présentes à Paris, Rennes et Bruz (Ille-et-Vilaine), et deux nouveaux bâtiments doivent sortir de terre d'ici à 2025. Preuve s'il en est d'une dimension cruciale des conflits : aujourd'hui, les pays s'affrontent aussi dans le cyberespace, à savoir notre environnement de réseaux informatiques, de logiciels, de câbles et de matériels toujours plus connectés.

Des signaux faibles indiquent qui est derrière une attaque

« Le cyberespace du ministère des Armées a des réseaux dont on se sert pour travailler — comme celui d'une entreprise du CAC 40 —, des réseaux plus classifiés qui ne sont pas reliés à Internet, mais aussi des systèmes faisant fonctionner nos infrastructures (climatisation, refroidissement des datacenters*) et nos matériels,* résume le colonel Pierre-Arnaud Borrelly, commandant du GCA. *Sur un véhicule blindé d'infanterie, on trouve les mêmes calculateurs que sur un camion civil, mais susceptibles d'être attaqués.* » S'y ajoutent les systèmes d'armes, par définition extrêmement surveillés, nécessitant des moyens tels, pour les atteindre, qu'ils ne constituent paradoxalement pas des cibles privilégiées.

Historiquement, c'est la vaste cyberattaque subie par l'Estonie en 2007, attribuée à la Russie, qui a déclenché une prise de conscience qu'un État pouvait recourir à des telles « armes » *(voir la chronologie ci-dessus)*. En 2010, le virus Stuxnet, lancé contre les centrifugeuses iraniennes d'enrichissement d'uranium, a démontré l'impact matériel d'une telle opération. *« L'Ukraine, en 2014, est un autre jalon,* ajoute Julien Nocetti, maître de conférences à l'académie militaire de Saint-Cyr-Coëtquidan (Morbihan). *Pendant les périodes de guerre dans le Donbass, la Russie a visé des centrales électriques, des infrastructures portuaires, énergétiques… Avec le recul, on comprend que la Russie a testé grandeur nature ses armes numériques.* » Selon un rapport de Microsoft publié en juin, la Russie a en effet multiplié les attaques contre l'Ukraine, par logiciels destructeurs ou chiffreurs de données, dans les premiers mois de son invasion de février dernier.

Il reste que, mis à part le cas d'un conflit ouvert, l'ambiguïté est de mise. Les États revendiquent rarement une action dans le cyberespace, et des groupes cybercriminels employés comme mercenaires peuvent servir de paravent. *« Le coût d'une attaque informatique a fortement baissé,* poursuit le colonel Pierre-Arnaud Borrelly. *Maintenant, sur le* darkweb*, on trouve des kits d'attaque tout prêts.* » Des petits pays peuvent ainsi en attaquer de gros, ce qu'un arsenal conventionnel n'aurait pas permis. La nature même du monde cyber autorise à brouiller les pistes. *« Les frontières n'y sont pas celles du monde physique. L'opérateur qui conduit l'attaque ne se trouve pas forcément dans le pays d'où elle vient* », note François Deruty, directeur des opérations chez l'éditeur de cybersécurité Sekoia.

Pour faire face, l'arsenal des cybercombattants du quartier Stephant s'apparente aux outils bien connus des entreprises de la cybersécurité : veille sur des vulnérabilités, rétro-ingénierie

Juin 2017

NotPetya, un faux rançongiciel dévastateur, se répand dans le monde entier. Pour beaucoup, il s'agit d'une opération russe contre l'Ukraine qui a dégénéré.

AFP

Le programme NotPetya a détruit les données de milliers d'entreprises (ici, le chemin de fer allemand).

Janvier-février 2022

Une opération de défacement (modification de pages Web), de destruction de données et de déni de service cible les sites gouvernementaux ukrainiens. La Russie envahit l'Ukraine le 24 février.

AFP

Le gouvernement ukrainien visé par une cyberattaque.

Avril 2020

Une cyberattaque coordonnée vise les installations hydrauliques israéliennes. Accusant l'Iran, Israël riposte par une cyberattaque créant le chaos dans le port iranien de Shahid Rajaee.

Mai 2021

Un rançongiciel paralyse le fonctionnement de l'oléoduc américain Colonial Pipeline, provoquant des pénuries de carburant. Le président Joe Biden estime que les autorités russes ont une part de responsabilité.

SIPA

Un rançongiciel a causé des pénuries de carburant.

de logiciels malveillants, surveillance et défense en temps réel des réseaux par des SOC (Security operations center), utilisation de « bacs à sable » numériques pour rejouer une cyberattaque et l'analyser. « *Certains programmeurs [de logiciels malveillants] savent qu'ils vont se faire analyser,* explique Fabio*, expert sous contrat au Centre d'analyse en lutte informatique défensive, une autre unité du Comcyber. *Ils vont donc mettre au point des techniques d'anti-analyse, mais nous savons qui procède ainsi. Toute une série de signaux faibles permettent de dire qui est derrière.* »

Pour Thierry Berthier, maître de conférences en mathématiques à l'université de Limoges et chercheur en cyberdéfense, la robotisation des matériels militaires va aussi exiger le recours à la version embarquée d'un outil de cybersécurité typique des entreprises, le Siem (système de gestion des événements et des informations de sécurité). Le principe consiste à surveiller tout ce qui se passe dans un système et à en déduire un modèle de normalité. « *Le Siem va détecter toute déviation de ce modèle et enclencher une alerte qu'il faudra analyser. C'est très efficace pour bloquer des menaces qui n'ont pas encore été documentées.* »

Ce travail d'analyse et d'anticipation alimente des exercices d'entraînement simulant des situations réalistes d'attaque. Parfois en utilisant des virus existants prisés du cybercrime. « *Nous développons aussi nos propres armes pour surprendre, car le jour où cela arrivera, nous ne serons peut-être pas frappés par quelque chose que tout le monde connaît* », prévient l'adjudant Sébastien, en charge de ces entraînements.

D'autant que les « frappes » sont loin de se résumer à effacer des données ou à provoquer le blocage ou le dysfonctionnement d'équipements chez l'adversaire. Espionnage et intrusion dans des réseaux en prévision d'actions futures tiennent encore le haut du pavé. D'après Microsoft, le renseignement russe s'y est livré contre 128 organisations de 42 pays aidant de près ou de loin l'Ukraine, avec 29 % de réussite. « *Le terme de cyberguerre a une connotation martiale et technique,* complète Julien Nocetti. *Je parle plutôt de conflictualité numérique, qui associe cyberattaques et opérations informationnelles, désormais omniprésentes et qui ont davantage d'impacts sur les décideurs et les populations.* » Twitter, Facebook et YouTube utilisés pour manipuler et déstabiliser, c'est aussi ça, l'art de la cyberguerre. ■ **Arnaud Devillard** @A_Devila

* Le prénom a été changé.

COMCYBER/GCA

« Le coût d'une attaque informatique a fortement baissé. Maintenant, sur le darkweb, on trouve des kits tout prêts »

Pierre-Arnaud Borrelly, commandant du Groupement de la cyberdéfense des armées

SPL/SUCRÉ SALÉ

Oiseau emblématique de l'île Maurice, le dodo (« Raphus cucullatus ») a disparu de la planète à la fin du XVIIe siècle. En mars dernier, son génome a été entièrement séquencé à partir d'un spécimen conservé au Danemark.

Désextinction

Le nouveau futur des espèces éteintes

Parviendra-t-on un jour à recréer un dodo, un mammouth voire un dinosaure ? Plusieurs scientifiques travaillent à « déséteindre » des espèces disparues en créant des hybrides, grâce à une réécriture de leur ADN. Mais ces projets suscitent de multiples questions éthiques et écologiques.

Par Rachel Mulot @RachelFleaux

« *Le génome du dodo est entièrement séquencé.* » Cette annonce inattendue* de la biologiste Beth Shapiro, lors d'un séminaire de la Société royale de médecine britannique en mars, a suscité dans le monde entier l'espoir de voir revenir à la vie cet oiseau de l'île Maurice. Incapable de voler, peu farouche, *Raphus cucullatus* a succombé à la fin du XVII^e^ siècle, moins de cent ans après l'arrivée des Européens, victime de la chasse, de la destruction de son habitat, mais aussi du pillage de ses nids par les rats, chats, chiens et cochons introduits par les marins. Cela fait vingt ans que Beth Shapiro, professeure à l'université de Californie à Santa Cruz, aux États-Unis (passée par l'université d'Oxford, au Royaume-Uni), récolte de l'ADN de dodo, établit ses parentés avec les oiseaux vivants les plus proches, comme le pigeon de Nicobar, et surtout travaille à séquencer son génome. Après maintes déconvenues, elle aurait donc trouvé l'oiseau rare : un spécimen de collection à l'ADN remarquablement conservé dans un musée au Danemark. Il ne sera cependant pas facile de ramener le columbiforme à la vie, car « *nous ne savons pas comment cloner les oiseaux, vu la complexité de leurs voies de reproduction [plus complexe que celle des mammifères]* », explique la biologiste. Ce qui n'empêche pas des groupes d'experts de travailler à « déséteindre » des volatiles et tester différentes approches pour surmonter les obstacles techniques. Aussi Beth Shapiro ne doute pas que l'on parviendra un jour, non pas à recréer un dodo ou un mammouth, mais des animaux leur ressemblant partiellement. « *Le génie génétique est* ▸

MICHAEL LONG/SPL/SUCRÉ SALÉ

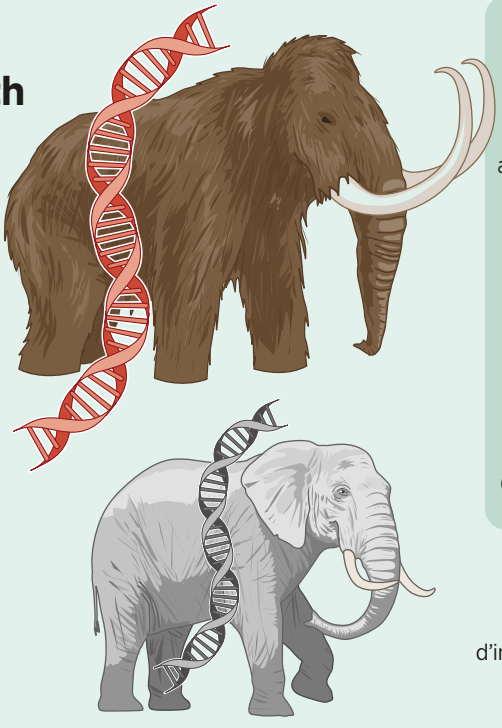
Réintroduire de grands herbivores dans le parc du Pléistocène, en Sibérie, est le rêve du chercheur russe Sergueï Zimov (vue d'artiste).

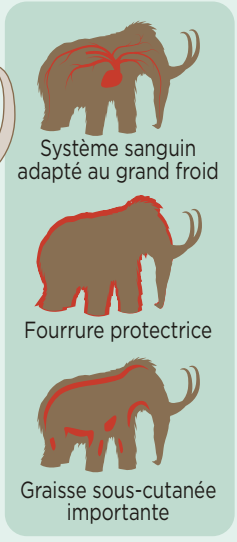
aujourd'hui un outil supplémentaire au service de la conservation des espèces et des écosystèmes », se réjouit-elle.

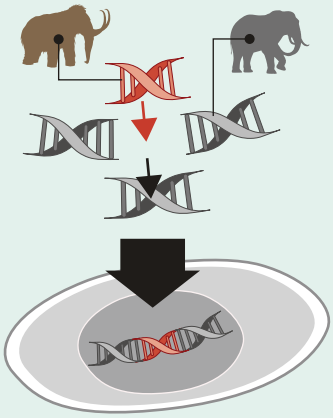
Mike Benton, paléontologue à l'université de Bristol (Royaume-Uni), reste sceptique. À choisir, il convient qu'il est plus raisonnable, et probablement plus faisable, de ramener à la vie un paisible dodo plutôt qu'un féroce *T-Rex* : « *On connaît l'habitat du dodo et il serait peut-être possible de le préserver* », commente-t-il prudemment. Mais le chercheur, qui ne partage pas le rêve de son confrère Jack Horner de fabriquer un « chickenosaure », ou pouletosaure *(lire l'encadré p. 46)* doute de l'intérêt et de la possibilité de pratiquer de telles expériences *(lire p. 44)*. Y compris sur le mammouth ou le tigre de Tasmanie, les deux animaux qui pourraient être les premiers à renaître, sous des formes très simplifiées.

Quelles sont les chances de mener à terme de telles entreprises ? Le graal serait de dénicher de la chair d'animal disparu gorgée de cellules sanguines miraculeusement préservées dans un sol continuellement réfrigéré. Un mirage. Personne n'accorde de crédit à l'entreprise coréenne Sooam Biotech (fondée par un scientifique déshonoré pour avoir prétendu à tort qu'il avait cloné des cellules humaines) qui assurait, en 2013, avoir trouvé du sang liquide de mammouth, conservé depuis dans le coffre-fort d'une mystérieuse université russe. En revanche, dûment publiée dans *Nature*, « *l'identification en 2019 par le Japonais Akira Iritani de*

Comment faire revivre un mammouth en 8 étapes







1 Récolter de l'ADN ancien en quantité et qualité suffisantes. Séquencer le génome de l'animal éteint.

2 Identifier les différences avec l'animal vivant le plus proche dont le génome a déjà été séquencé.

3 Repérer les gènes d'intérêt qui différencient le mammouth de l'éléphant.

4 Programmer des lignées cellulaires pour fabriquer des cellules de l'animal éteint. L'outil CRISPR servira à copier et coller de l'ADN de mammouth dans des cultures de cellules (fibroblastes) d'éléphant.

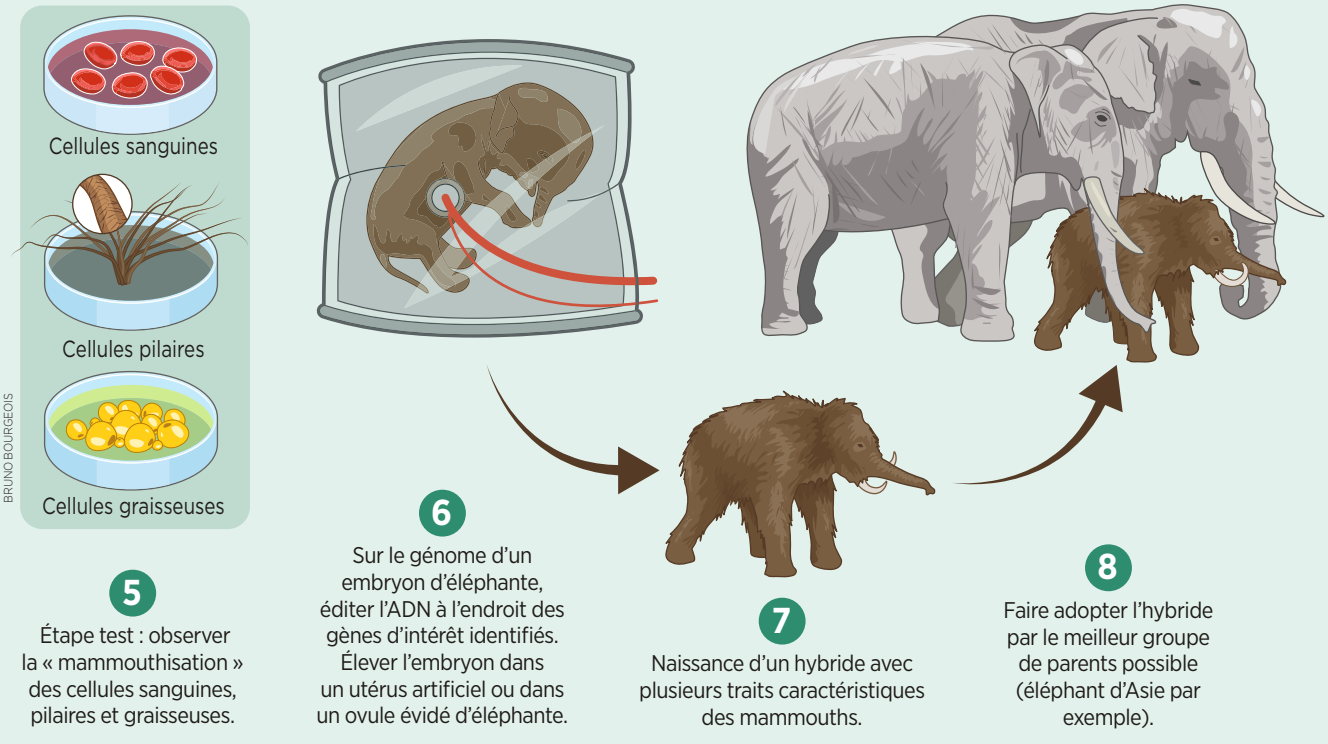
cellules d'un mammouth laineux vieux de 28 000 ans présentant une activité biologique a provoqué une énorme surprise, expliquent le paléontologue Lionel Cavin et le généticien Nadir Alvarez, auteurs de *Faire revivre des espèces disparues ?* (Favre, 2022). *Car elle ouvre la voie à un projet futuriste… tenter un clonage classique par transfert de noyau de cellules, comme pour la brebis Dolly, pour créer un embryon, puis utiliser comme mère porteuse une éléphante d'Asie, la parente la plus proche.* » Même avec des cellules vivantes correctement congelées, ce n'est pas gagné, rappelle toutefois le duo. Une expérience précédente tentée en 2003 sur le dernier bouquetin des Pyrénées, Celia, a été un échec. Cette approche pourrait néanmoins sauver dans le futur des espèces aujourd'hui menacées. Ainsi, au Frozen Zoo, un programme du zoo de San Diego (États-Unis), sont conservés des échantillons de quelque 1100 espèces rares. En 2021, un putois à pieds noirs d'Amérique, mort il y a plus de trente ans, a ainsi été cloné à l'aide de cellules cryogénisées. Les chercheurs élèvent Elizabeth Ann, la petite clone, pour l'introduire dans la nature en compagnie de sa progéniture, avec l'espoir de contribuer à injecter de la diversité dans une population fortement consanguine.

Mais comment faire lorsqu'on ne dispose pas de cellules correctement préservées ? Comme matériau de base, les généticiens possèdent surtout de l'ADN ancien, souvent très dégradé, récolté dans les ossements ou tissus de spécimens issus de fouilles ou de collections des musées. Il s'agit ensuite de créer une cellule, l'éditer puis *« la transformer en un animal vivant, respirant et réel »* comme le dit joliment Beth Shapiro. À ce jour, les scientifiques, assistés de puissantes machines d'amplification, de tri et d'assemblage d'ADN, sont notamment parvenus à séquencer les gènes des mitochondries (transmis uniquement par les mères) du grand pingouin et d'un ours des cavernes, mais aussi les gènes des noyaux cellulaires de moas ainsi que du tigre de Tasmanie, de plusieurs mammouths et de chevaux préhistoriques.

PETER BARRERAS/UCSC

« Le génie génétique est un outil supplémentaire au service de la conservation des espèces et des écosystèmes »

Beth Shapiro, biologiste, professeure à l'université de Californie à Santa Cruz (États-Unis)



ÉTHIQUE

Pourquoi ils sont contre...

« *Consacrer des ressources à la désextinction pourrait entraîner une perte nette de biodiversité.* » C'est la conclusion d'une étude parue dès 2017 dans *Nature Ecology & Evolution,* qui précisait qu'« *allouer des sommes aux programmes existants sur les espèces menacées permettrait de sauver environ deux à huit fois plus d'espèces qu'en donnant le même montant aux efforts de désextinction.* » Dans un monde où les budgets sont restreints, « *il vaut mieux dépenser l'argent pour les vivants que pour les morts,* résume l'auteur principal, l'écologue Joseph Bennett, de l'université Carleton à Ottawa (Canada). *Si un milliardaire ne s'intéresse qu'à "ramener une espèce d'entre les morts", le pouvoir lui revient, mais il sera fallacieux de dire qu'il s'agit d'une "conservation de biodiversité", car il y a beaucoup d'espèces au bord de l'extinction maintenant, qui pourraient être sauvées avec les mêmes ressources.* » Reste que les coûts de la désextinction sont totalement absorbés par des intérêts privés et ne nuisent pas aux budgets de conservation publics. Mais avec quelle promesse pour restaurer la biodiversité ? Les chercheurs estiment que l'augmentation ne pourrait être que légère et limitée aux animaux pour lesquels les techniques de conservation sont déjà bien en place. Ainsi, faire revivre la bécassine de Forbes, un oiseau à long bec de Nouvelle-Zélande éteint vers le XIXe siècle, fonctionnerait uniquement parce que de nombreuses pratiques de conservation de son habitat sont déjà en cours sur les îles Chatham. Pour le tigre de Tasmanie ou le mammouth, ce serait beaucoup plus douteux. De surcroît, « *ces approches occultent le fait que nous tirons une quantité sous-estimée de services de la biodiversité, sans lesquels les sociétés humaines ne peuvent survivre, comme la pollinisation, la régulation des flux d'eau et de carbone, la fertilité des sols, les ressources pharmacologiques,* abonde Tatiana Giraud, directrice de recherche dans l'unité Écologie, systématique et évolution (université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech). *Nous dépendons de nombreuses espèces, elles-mêmes dépendantes d'autres espèces, et nous ne savons même pas quelles sont les espèces clefs de voûte sans lesquelles ces services disparaîtront.* » Pour la biologiste, « *le discours de la désextinction, dangereux, participe à l'idée que rien n'est grave, que la technologie résoudra les problèmes et* in fine *décourage l'action de protection des espèces dont nous dépendons, mais qui sont moins charismatiques que le mammouth.* » Au-delà des souffrances pour les mères porteuses et leurs rejetons hybrides, l'introduction de nouveaux animaux « *n'est pas sans péril pour les écosystèmes ou les animaux qui y vivent déjà,* souligne-t-elle encore. *Enfin, pour qu'une population soit viable, il faut un nombre critique d'individus, aux génotypes variés, et les généticiens ne pourront jamais régénérer toute la diversité génétique nécessaire.* » ■

« L'introduction de nouveaux animaux n'est pas sans péril pour les écosystèmes »

Tatiana Giraud, directrice de recherche dans l'unité Écologie, systémique et évolution (université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech)

CARLETON UNIVERSITY - SERGE PICARD/AGENCE VU

« Il vaut mieux dépenser l'argent pour les espèces vivantes que pour les espèces mortes »

Joseph Bennet, écologue, professeur à l'université Carleton, à Ottawa (Canada)

Le génome obtenu peut être plus ou moins partiel et nécessiter des années d'affinement. Ensuite ? « *Tout projet de désextinction commence par la recherche du parent vivant le plus proche de l'animal en question* », explique Andrew Pask, professeur d'épigénétique à l'université de Melbourne (Australie), qui veut ramener à la vie un tigre de Tasmanie, disparu en 1936. Pour ce marsupial, l'élue est la souris dunnart à queue grasse, bien plus petite que son illustre cousin (80 g en moyenne contre 25 kg) : elle fournira les cellules vivantes et le génome modèle qui sera ensuite modifié pour ressembler à celui du thylacine (ou loup de Tasmanie).

Place ensuite à la procréation assistée et l'utilisation de cellules souches vivantes pour fabriquer un embryon, transféré ensuite dans l'utérus d'une espèce hôte. La différence de taille entre le futur bébé thylacine et sa mère porteuse ne semble pas embarrasser le chercheur : il envisage de transférer le fœtus dans la poche d'une mère marsupiale plus grande, diable de Tasmanie ou kangourou par exemple.

Reproduire à l'identique une espèce disparue est impossible

Le projet suscite de multiples questions éthiques et écologiques, mais Andrew Pask l'assure : « *Dans dix ans, nous pourrions avoir notre premier bébé thylacine vivant.* » La confiance de ce chercheur — dont le slogan est : « *Transformer la science-fiction en science des faits* » — a grimpé en flèche en août, quand il a rejoint la start-up de génie génétique Colossal Biosciences de Dallas (États-Unis), cofondée par celui qui est considéré comme le « pape » de la désextinction des espèces, George Church, professeur de génétique de la Harvard Medical School (Boston, États-Unis). Ce dernier se consacre pour sa part à la résurrection du mammouth et envisage de s'affranchir de certaines difficultés en créant des embryons par de nouvelles voies et en utilisant un utérus artificiel pour la gestation des futurs petits éléphants préhistoriques *(voir l'infographie pp. 42-43)*. Clairement, ces scientifiques ne feront pas revenir des espèces disparues à l'identique, mais des hybrides dont certains traits évoqueront ceux des espèces disparues, grâce à une réécriture de leur ADN.

JOHN SIBBICK/SPL/SUCRE SALÉ

Le tigre de Tasmanie, disparu en 1936, pourrait être recréé à l'aide d'un parent proche, la souris dunnart à queue grasse.

MICHAEL LONG/SPL/SUCRE SALÉ

Disparu en 1627, l'aurochs (illustration) a été « reconstitué » par croisement avec des vaches.

AUROCHS

Une reconstitution par sélection domestique

Depuis 2008, le programme Tauros, piloté par l'université d'Utrecht (Pays-Bas), tente de reconstituer des aurochs par croisement, sélection et identification des gènes toujours présents dans les races actuelles. Les premières vaches choisies l'ont été en raison de leur robe ou de leur morphologie évoquant le puissant bovin disparu en 1627. En 2016, une étude a calculé la distance génétique entre différentes races et le génome d'un aurochs, obtenu à partir de l'ADN d'un fossile de 6700 ans. De quoi affiner la sélection et se concentrer sur des races d'Espagne et de Podolie (région historique d'Europe de l'Est). 500 néo-aurochs sont nés. Depuis 2015, l'ONG Rewilding Europe (Réensauvager l'Europe) leur fournit des lieux d'élevage et de reproduction notamment au Portugal, en Croatie, en Roumanie, en Laponie suédoise, dans le delta du Danube et les Carpates du Sud.

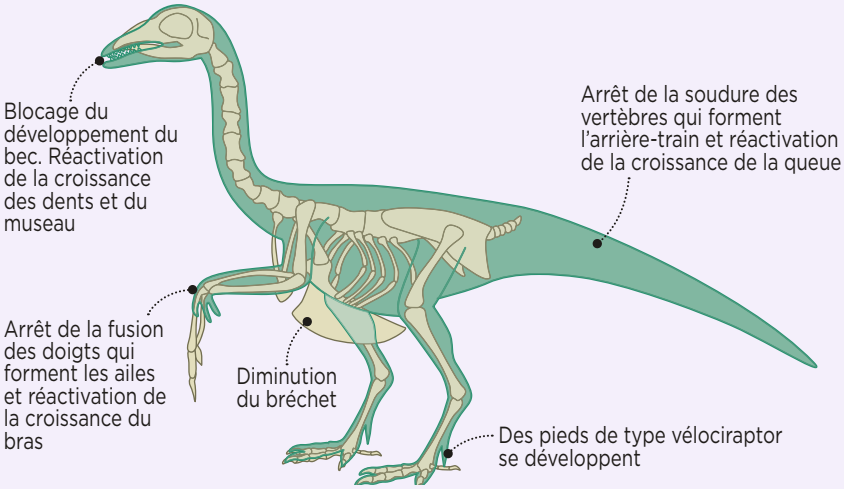
Reproduire à l'identique un animal éteint depuis des centaines ou milliers d'années serait impossible, a d'ailleurs démontré en mars Tom Gilbert, généticien évolutionniste à l'université de Copenhague (Danemark), qui a tenté de séquencer le génome du rat de l'île de Christmas, dans l'océan Indien, disparu en 1908 seulement, et étroitement apparenté au rat de Norvège, un animal de laboratoire très étudié, avec une séquence génomique complète, aisément modifiable. Même avec ces candidats idéaux, le chercheur n'est pas parvenu à reconstituer, à 5 % près, l'entièreté du génome originel du rat disparu.

Dans ces conditions, qu'est-ce qu'une véritable désextinction ? Pour Beth Shapiro, la réponse n'est pas tant d'ordre génétique qu'écologique.

EXPÉRIMENTATION

Dinosaures : est-il possible de renverser l'évolution ?

En 2015, les biologistes du développement Bhart-Anjan Bhullar (université Yale, États-Unis) et Arkhat Abzhanov (université Harvard, États-Unis) sont parvenus à inverser l'évolution d'embryons de poulets, leur faisant pousser un museau de reptile au lieu d'un bec. Une rétro-évolution qui devait préfigurer la création d'hybrides mi-volaille, mi-dinosaure, projet cher au paléontologue américain Jack Horner. Concrètement, les chercheurs ont réactivé des gènes dinosaures ancestraux chez la volaille et découvert qu'aux premiers stades de l'évolution des volatiles, les os jumeaux qui formaient le museau chez les dinosaures comme chez les reptiles se sont allongés et ont fusionné pour former un bec. Leurs manipulations suivantes visaient à rabougrir les ailes de poulet et surtout à leur faire repousser une queue. Mais depuis peu, leur approche a dû changer. *« Le projet Chickenosaurus est toujours en cours,* assure Jack Horner, *mais nous avons découvert que la réduction de la queue, lorsque des dinosaures sont devenus des oiseaux, ne s'est pas opérée par un gène atavique.* » En biologie de l'évolution, un atavisme est la réapparition d'un caractère ancestral incongru chez un individu, ce trait ayant normalement été perdu ou transformé au cours de l'évolution. *« Nous essayons donc maintenant de découvrir comment la queue de l'oiseau s'est formée,* indique-t-il. *Une fois cela compris, nous tenterons de reconstituer une queue de dinosaure.* »



Le projet « Chickenosaurus » consiste à modifier un poulet (squelette en jaune) en un petit dinosaure du genre « compsognathus » (silhouette verte).

LIONEL CAVIN/ BRUNO BOURGEOIS

« La naissance d'un animal capable, grâce à l'ADN de mammouth ressuscité, de vivre dans l'environnement où un mammouth vivait et agissait […] sera une désextinction réussie, même si le génome de cet animal est au final plus semblable à celui d'un éléphant qu'à celui d'un mammouth », écrit-elle dans son livre *How to clone a mammoth* (2015, Princeton Science Library, non traduit). Pour les partisans de ces « résurrections », le retour d'espèces ayant joué un rôle écologique important dans leur ancien habitat pourrait profiter à des régions entières. *« Tandis que George Church affûtait ses outils pour éditer un génome de* Mammuthus primigenius, *le scientifique russe Serguei Zimov s'intéressait en parallèle à la renaissance de leur écosystème constitué de prairies avec une grande biodiversité,* explique Eriona Hysolli, responsable scientifique du projet Woolly Mammoth Revival chez Colossal Biosciences. *Son hypothèse est qu'en recréant cet environnement, l'augmentation de la végétation et de la biodiversité pourrait ralentir le réchauffement climatique, ou du moins ses effets dans le Grand Nord.* ». Cette promesse est même devenue l'argument phare de la start-up américaine, qui a récolté 74,9 millions d'euros en deux tours de table, entre septembre 2021 et mars 2022. Seule certitude, si des petits néo-mammouths naissent un jour, suffisamment armés contre le froid, le parc du Pléistocène en Sibérie leur ouvrira grand l'espace arctique ! ■

* L'annonce du séquençage du dodo est consultable sur Youtube (en anglais) : **sciav.fr/910dodo**

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Dessin : www.Mai-Lan.fr

Inventez le monde de demain :
Faites votre thèse avec l'ADEME

PROGRAMME THÈSES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et un cofinanceur public ou privé, l'ADEME finance des thèses pendant 3 ans pour contribuer à la transition écologique.

WWW.ADEME.FR / THESES

Pour **en savoir plus**

Et poser vos questions :
www.ademe.fr

GRAND OCEAN

Manifeste pour une civilisation de l'océan

Le Festival Grand Océan, organisé par « Sciences et Avenir–La Recherche », s'est déroulé à Cherbourg début octobre avec comme point d'orgue la déclaration élaborée par six « sages » qui ont tenu à rappeler les bienfaits de l'océan.

Et si on disait désormais planète Mer au lieu de planète Terre ? Avec des eaux qui recouvrent 70 % du globe, il serait temps de passer à la « *civilisation de l'océan* ». C'est le message qu'ont peu ou prou voulu faire passer plus d'une trentaine de scientifiques réunis par *Sciences et Avenir–La Recherche*, lors du Festival Grand Océan (1), qui s'est déroulé à la Cité de la mer à Cherbourg-en-Cotentin puis à Saint-Vaast-la-Hougue, du 7 au 9 octobre, et dont on peut revivre toutes les interventions (2). « *Merci à l'océan* », ont lancé dès l'ouverture six « sages » (3) qui ont tenu à rappeler tous ses bienfaits. « *Nous avons voulu une déclaration qui nous touche tous, c'est-à-dire chacun d'entre nous* », a insisté l'explorateur Jean-Louis Étienne, « *car nous avons tous un rôle à jouer, enfants comme adultes* ».

ANTOINE SOUBIGOU

Jean-Louis Étienne lit la déclaration pour la préservation de l'océan, en présence des cinq autres « sages ».

Le défi, en effet, est grand. Les sages ont rappelé le rôle de régulateur du climat que joue l'océan, qui capte un tiers des émissions de gaz carbonique responsables de l'augmentation de l'effet de serre et donc du réchauffement du climat. Avec ce réchauffement, les eaux se dilatent et le trait de côte va changer. Pour l'instant, l'élévation du niveau de l'eau n'est que de 3,2 mm par an en moyenne, mais les regards se tournent vers les calottes polaires, dont la fonte aurait des conséquences catastrophiques. Nous devrions penser en termes « *d'aquasphère, d'hydrosphère* », où l'on prendrait en compte aussi bien les géants comme le Pacifique, l'Atlantique, les océans indien et austral, que les mers, Méditerranée, mer Noire… ainsi que les rivières, note la navigatrice et députée européenne Catherine Chabaud.

Ce qui devrait aussi nous toucher fondamentalement ? Le fait que la vie sur Terre est apparue dans l'eau, avant d'aller conquérir les continents. Comme l'ont résumé les sages, « *l'océan, c'est nous* ». L'ancien président du Muséum national d'histoire naturelle Gilles Bœuf rappelle que « *nous sommes faits d'eau et notre sang garde la trace de l'eau salée originelle* ». C'est dire notre responsabilité individuelle et collective, à nous humains, partout sur la planète, pour ce qui constitue un gigantesque bien commun. « *C'est bien là la tragédie, celle des biens communs* », juge le président du Conseil international des sciences (ISC), le Néo-Zélandais Peter Gluckman. Qui pour en prendre soin ? L'océan est à tout le monde, donc à personne ? Il nous faut une « *nouvelle forme de gouvernance pour cet espace mondial sans gouvernement* », la haute mer, à l'instar de l'espace cosmique. L'océan, c'est la vie, et il nous faut rester optimiste, tout en s'engageant, insistent aussi bien la navi-

FABIEN MICHENET / BIOSPHOTO

Les baleines jouent un rôle important dans la lutte contre le changement climatique, grâce à leur capacité à absorber d'importantes quantités de CO_2. La nécessité d'assurer la protection de ces mammifères marins en est d'autant plus cruciale.

FRANÇOIS SARANO
PLONGEUR ET RÉALISATEUR

« Ce qu'offre le dernier territoire sauvage »

« Les animaux marins vous permettent encore de tisser des liens avec eux. Quand vous êtes à leur contact, vous réalisez profondément que vous faites partie de leur monde. Quand vous tissez des liens ou qu'ils tissent des liens avec vous, vous vous sentez partie de ce monde, vous vous sentez comme eux parcelle d'océan. Votre regard d'extérieur devient un regard tout petit à côté d'eux, d'intérieur. Tout votre rapport au monde et aux autres est changé. C'est ça que vous offre ce dernier territoire sauvage. »

Extrait de la conférence de François Sarano donnée le 8 octobre lors du festival Grand Océan. À revoir sur : sciav.fr/910sarano

gatrice Anne Quéméré que le grand chef cuisinier Olivier Roellinger. Ce dernier voit aussi dans l'océan un « *garde-manger de l'humanité* ». Il importe d'enfin le préserver de la pollution, tout particulièrement celle du plastique — 400 millions de tonnes sont fabriquées chaque année, il y aurait entre 75 et 200 millions de tonnes déjà accumulées dans l'eau (4) — qui pollue en retour nos assiettes. Il faut s'efforcer de régénérer l'océan, et pas seulement dans des aires protégées. C'est en accord avec des professionnels de la mer soucieux de la conservation des espèces, pratiquant notamment une pêche durable que cela pourra être accompli, estime Olivier Roellinger.

Reste qu'il y a urgence, et tous les scientifiques l'ont répété. Que ce soit pour protéger les grands animaux marins, dauphins, requins, cachalots… avec lesquels le plongeur et réalisateur François Sarano nous fait vibrer, ou bien les invisibles tel le plancton, qu'analyse sans relâche la Fondation Tara et, demain, la mission Bougainville. Ou pour développer la culture des algues, de vraies « *bombes nutritionnelles* », s'enthousiasme Olivier Roellinger, rappelant qu'« *au Japon, elles constituent 10 % de l'alimentation* ». Des algues qui, selon Vincent Doumeizel, conseiller pour les océans (Pacte des Nations unies), pourraient conduire les générations futures à vivre rien de moins qu'une révolution de civilisation. ■

Dominique Leglu
@Dominiqueleglu

La déclaration

Merci à l'océan !
L'océan est le grand régulateur du climat, il capte un tiers des émissions de gaz carbonique, il absorbe 93 % de l'excès de chaleur dû au réchauffement climatique. C'est un poumon essentiel de la vie sur Terre.

L'océan, c'est nous.
Comme l'océan, nous, êtres humains, sommes constitués d'eau liquide et de sel. La vie est née de l'océan, l'océan est la vie.

L'océan, garde-manger de l'humanité.
L'océan nourrit la moitié de l'humanité. Battons-nous pour sauver sa biodiversité, avec les professionnels de la mer.

Tous responsables de l'océan !
L'océan est devenu une poubelle. À terre comme en mer, agissons personnellement et collectivement au quotidien pour régénérer les rivières, les mers et l'océan.

Éduquer, c'est la clé.
Comprendre et faire aimer l'océan, dès la petite enfance. L'océan est notre avenir et source d'espoir.

(1) Avec le pôle événementiel Les Échos-Le Parisien, et le soutien de Cherbourg, la communauté d'agglomération du Cotentin, le département de la Manche, la région Normandie et Naval Group, EDF, CMN, SNCF Gares et connexions, OFB, Fondation de la Mer, SFA.

(2) Les interventions sont visibles en replay sur le site www.grandocean-event.com

(3) Les six sages sont l'explorateur Jean-Louis Étienne, l'ancien président du Muséum national d'histoire naturelle Gilles Boeuf, les navigatrices Anne Quéméré et Catherine Chabaud, le chef Olivier Roellinger et Peter Gluckman, président du Conseil international des sciences.

(4) Source : Programme des Nations unies pour l'environnement, « Our planet is choking on plastic ».

H.-C. DITTRICH / AFP

5 questions pour se mettre à la sobriété énergétique

Comment passer cet hiver en consommant moins d'énergie… et en tentant de limiter ses factures ? Un enjeu de taille puisqu'une baisse de 30 % se traduirait par 450 euros d'économie, selon l'agence de conseil énergétique Électroguide.

Par Jacques Hennen, avec Agence Forum News

1 Quels sont les gestes de la vie quotidienne les plus efficaces ?

Le premier poste de dépenses étant le chauffage, selon l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), c'est par là qu'il faut commencer. Deux impératifs : entretenir régulièrement sa chaudière (jusqu'à 10 % d'économies selon l'Ademe) et baisser la température ambiante à 19 degrés en journée et jusqu'à 17 degrés dans les chambres (- 7 à - 10 % du budget chauffage). *« Il est très utile aussi d'équiper les radiateurs de robinets thermostatiques et d'utiliser un programmateur hebdomadaire pour chauffer (électrique) pendant les heures creuses »*, explique l'agence Quelle Énergie (groupe Effy, consultant en économies d'énergie). Sans oublier la nécessité de purger les radiateurs pour vider l'air et augmenter l'efficacité. Il faut aussi limiter ou supprimer les radiateurs d'appoint qui consomment beaucoup pour un rendement très faible. Autre priorité : veiller au bon état de ses appareils ménagers. *« Un ballon d'eau chaude bien entretenu, des congélateurs et réfrigérateurs bien remplis, un dégivrage régulier et des portes vite refermées permettent d'économiser jusqu'à 10 % »*, selon l'agence Europe Énergie. L'Ademe rappelle *« qu'il faut penser à débrancher les appareils au lieu de les laisser en veille, laver son linge à froid ou à basse température (90 % d'économies si les machines sont classées A ++), et toujours utiliser le mode* « Eco ». Il faut aussi éviter le sèche-linge.

2 Quels investissements peut-on faire pour mieux isoler son logement ?

L'isolation est l'investissement le plus rentable, et l'aménagement des combles est prioritaire. Selon l'Ademe, une maison mal isolée, c'est 30 % de déperdition énergétique. Le nouveau double vitrage avec un vide d'air entre les parois est très performant, selon une étude de Saint-Gobain qui évoque jusqu'à 40 % d'économies de chauffage. L'achat d'équipements de dernière génération est aussi à préconiser, car plus « durables » : nouvelles chaudières à gaz à condensation, ballon thermodynamique (très économe en énergie). Enfin, la « maison bioclimatique » adapte son architecture au terrain et au climat, utilise toutes les ressources naturelles environnantes jusqu'à réduire la consommation payante à zéro ! En optimisant entre autres le rayonnement du soleil (maison tournante), explique-t-on chez Quelle Énergie.

CHIFFRES CLÉS

Entre 48 et 277 euros par an
Le chèque énergie finance une partie des factures d'énergie des personnes aux ressources modestes.

3,5 millions
Le nombre de ménages français qui ont réalisé en 2020 des travaux de rénovation dans leur maison individuelle.

De 900 euros et 1800 euros
L'amplitude moyenne de la facture de chauffage d'un ménage par an, selon qu'il isole parfaitement son logement ou non.

hellio

L'énergie la moins chère ? Chauffez-vous au bois !

Installez une chaudière à granulés et baissez vos factures jusqu'à 50 %.
Le bois est le combustible le moins cher du marché.

Jusqu'à **15 000 €** d'aides

SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

Votre énergie a de l'impact

hellio

Démarrez votre projet
sur le site particulier.hellio.com
ou au 01 87 66 61 93

*grâce aux aides de l'État déduites sur le devis

Avis Vérifiés by Net Reviews

★★★★☆ 4,2/5
sur 4 490 avis

3 Les énergies renouvelables sont-elles la solution ?

Pour Nicolas Leclerc, expert et cofondateur de l'agence Omnegy, *« à court terme, les pompes à chaleur sont les plus efficaces actuellement »*. Le principe ? Puiser la chaleur de la terre grâce à des capteurs enterrés. La température « de base » reste stable toute l'année, de l'ordre d'une dizaine de degrés. Avec une pompe à chaleur aérothermique, la chaleur est cette fois captée dans l'air environnant. Le photovoltaïque combiné avec le solaire (réchauffement direct d'un liquide dans des micro-tuyaux sur le toit) perce enfin, avec des prix plus attractifs et des rendements supérieurs. Selon les experts de QuelleEnergie.fr, le photovoltaïque combiné peut satisfaire 70 % des besoins en eau chaude et 25 % en chauffage. Les panneaux solaires de nouvelle génération ont des rendements toujours plus élevés. Selon une étude d'EDF, la facture d'eau chaude peut baisser de 70 % après trois ans d'investissement. Parmi les nouveautés, les panneaux bifaciaux (bifacial solar cells, BSC), qui captent le soleil des deux côtés, et les tuiles solaires. L'éolienne domestique a, en revanche, du mal à s'imposer et coûte encore cher en investissement. Si l'on a la chance d'habiter près d'une rivière, on peut faire installer une mini-centrale hydroélectrique (l'eau de la rivière alimente une turbine avec une pression de 6,5 bars, suffisante pour générer 800 watts/heure stockés dans une batterie).

4 Comment s'y retrouver dans les aides financières ?

Elles sont nombreuses. Depuis janvier, un site Internet unique a été lancé, France-renov.gouv.fr, qui permet d'avoir une vision d'ensemble. Principales aides : MaprimeRenov', de l'Anah (Agence nationale de l'habitat), l'éco-prêt à taux zéro (le prêt peut aller jusqu'à 50 000 euros et permet de préfinancer les travaux), la prime Coup de pouce (elle finance certains travaux de chauffage, d'isolation et thermostat). Rappelons que les travaux de rénovation bénéficient de la TVA à 5,5 %, et que les propriétaires bailleurs bénéficient aussi de divers dispositifs (economie.gouv.fr). Enfin, l'Ademe rappelle le succès du dispositif CEE (certificat d'économies d'énergie) pour entreprises, collectivités et particuliers.

5 Quelles sont les technologies de l'habitat du futur ?

Des start-up multiplient les innovations dans le secteur de la consommation énergétique. Netatmo a mis au point des vannes connectées et un thermostat intelligent, Hydrao propose une douche qui veille sur votre consommation. Lancey, start-up grenobloise, améliore des radiateurs qui stockent l'énergie aux heures creuses lors des pics de consommation. Ween a lancé le thermostat qui vous géolocalise et détecte votre présence et vos habitudes (25 % d'économies promises). Et pour contrôler, Wivaldy a créé une appli gratuite qui suit au plus près votre consommation (facture réduite de 15 %). Quant à l'éolienne cerf-volant domestique, inventée par Enerkite et Kitewinder, elle est plus facile à implanter chez soi que mât et pales ! ■

AVIS D'EXPERT

MARC ALRIC FONDATEUR DE LA SOCIÉTÉ EFICIA, SPÉCIALISÉE DANS LE CONSEIL ÉNERGÉTIQUE

« Les entreprises peuvent économiser jusqu'à 40 % »

EFICIA

Particuliers, entreprises, collectivités… Tout le monde doit-il fournir des efforts ?
Oui, il ne faut pas compter seulement sur le bouclier tarifaire protecteur du gouvernement, qui encadre les hausses entre 5 et 10 %. Une PME qui fait intelligemment des économies d'énergie à tous les niveaux peut faire baisser sa facture de 20 à 40 %, c'est considérable.

Quel est le poste le plus important selon vous ?
D'évidence, c'est le chauffage. Une entreprise doit pouvoir baisser la température dans ses locaux la nuit à 15 degrés, et à 18 ou 19 degrés en journée et même couper temporairement le chauffage, ne serait-ce qu'une à deux heures au moment des pics de consommation. En particulier en janvier et février. Viennent ensuite le passage à l'éclairage avec les ampoules basse consommation (LED), l'isolation, l'installation du photovoltaïque... Il faut prendre de bonnes habitudes, car l'énergie va coûter de plus en plus cher dans les années qui viennent.

Qui des particuliers ou des entreprises est le mieux à même de changer ses habitudes ?
C'est plus compliqué pour les entreprises qui doivent convaincre leurs collaborateurs et faire des économies d'échelle. Mais elles peuvent se faire accompagner. Il existe des applications gratuites qui facilitent le suivi continu nuit et jour des économies. Des spécialistes proposent aussi du consulting clé en main pour une gestion énergétique optimale.

■ **Propos recueillis par J. H.**

Photo: © ACF / Emmanuel Simiand - RCA. Réalisation : Atropine

ENSEMBLE, TRANSMETTONS-LEUR UN MONDE SANS FAIM

Choisir de transmettre un legs ou une assurance-vie à Action contre la Faim, c'est faire le choix d'un monde plus juste. Par ce geste, vous nous aiderez concrètement et durablement à sauver des vies et à faire reculer la faim. Nous sommes à vos côtés pour vous permettre de réaliser ce magnifique projet, pas à pas et en confiance.

DEMANDE DE DOCUMENTATION GRATUITE ET CONFIDENTIELLE

☐ **OUI, je souhaite recevoir gracieusement, en toute confidentialité et sans engagement, mon livret sur les legs et les assurances-vie.**

☐ Mme ☐ M.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : ⌊_____⌋ Ville : .....

Mon numéro de tél. : ⌊_____⌋ E-Mail : ..... @ .....

ACTION CONTRE LA FAIM

Bulletin à retourner sous enveloppe affranchie à : Action contre la Faim - À l'attention de Manon Besson
14/16 Boulevard de Douaumont - CS 80060 - 75854 Paris Cedex 17
Et pour un échange personnalisé, n'hésitez pas à nous contacter :
01 70 84 84 84 (Ligne directe) - servicelegs@actioncontrelafaim.org

DON en CONFIANCE

22PLN2SA

Conformément à la loi Informatique et libertés du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès de suppression et de rectification aux données personnelles vous concernant en vous adressant au siège de notre organisation.

224
F4
2
F8
18
Fp2

La science lit dans les pensées

C'est le rêve de tout neuroscientifique qui se réalise : parvenir à traduire les ondes cérébrales en mots ou en images… Des avancées technologiques rendues possibles par la puissance d'analyse des algorithmes d'intelligence artificielle associée à la finesse des appareils de neuro-imagerie. Décryptage des dernières innovations.

Dossier réalisé par
Camille Gaubert, Nicolas Gutierrez C.
et Hugo Jalinière

COMPRENDRE
Comment l'IA traduit le langage des neurones p. 56

SOIGNER
Décrypter le cerveau pour faire parler les corps paralysés p. 60

ÉTHIQUE
Nos pensées ne peuvent être décodées qu'avec notre consentement p. 64

AMÉLIORER
Des capacités cérébrales augmentées p. 65

WYSS CENTER

Comprendre

Comment l'IA traduit le langage des neurones

Grâce aux progrès de la neuro-imagerie couplés à la puissance des nouveaux algorithmes, les chercheurs parviennent à analyser les ondes cérébrales d'une personne pour reconstruire les mots qu'elle entend ou les images qu'elle voit. Fascinant.

La chose est à peine croyable, mais il est aujourd'hui possible, presque littéralement, de lire dans les pensées. Pour être précis, on dira plutôt « *décoder des contenus cognitifs dans le cerveau* », mais les résultats sont là : images, mots lus ou entendus, mouvements, émotions même… Dans le cerveau, tout commence à se voir, jusqu'aux sentiments intimes, grâce aux progrès de la neuro-imagerie couplés à des puissances de calcul décuplées ces dernières années. « *L'idée, c'est qu'à n'importe quelle activité cognitive correspond une certaine configuration d'activation du cerveau,* pose Bertrand Thirion, chercheur de l'équipe Mind à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). *Or, si l'on peut observer l'activité de votre cerveau, on peut faire le chemin en sens inverse et dire quelle est l'activité cognitive correspondant à telle activation neuronale ; et ainsi, reconstruire une image que vous voyez, ou que vous imaginez, ou encore des phrases avec certaines sémantiques.* »

Reconstituer les mots qu'une personne entend « dans sa tête »

Analyser les ondes électromagnétiques cérébrales d'une personne pour reconstruire les mots qu'elle entend « dans sa tête », c'est précisément ce qu'a fait une équipe française du laboratoire européen Meta AI Research (ex-Facebook), de l'Inria et des universités Paris-Saclay et Paris Sciences & Lettres. L'étude publiée dans *Scientific Reports* cet automne a de quoi impressionner : les données d'ondes cérébrales de 169 sujets, captées pendant qu'ils écoutaient des enregistrements de personnes en train de parler, ont été découpées par séquences de trois secondes. Ces séquences d'ondes cérébrales ont été transmises à une IA en même temps que les fichiers sonores correspondants pour qu'elle apprenne à repérer les motifs d'activité cérébrale correspondant aux mots. Si la démonstration est frappante, la précision de l'algorithme est encore trop faible pour envisager des applications à court terme : pour chaque enregistrement cérébral, l'intelligence artificielle (IA) a prédit une liste de 10 mots, et 73 % du temps, cette liste comprenait le mot effectivement prononcé. Peut mieux faire donc… ou pas, la résolution de la neuro-imagerie a ses limites *(lire l'encadré p. 59)*.

Pour ce qui est des images, Bertrand Thirion avait dès 2006, avec Stanislas Dehaene, expert en neurosciences cognitives, cartographié une corres-

THIRZA DADO

« À l'avenir, nous pourrons décoder des expériences subjectives, peut-être même nos rêves »

Thirza Dado, doctorante à l'université Radboud (Pays-Bas)

SHEN G, HORIKAWA T, MAJIMA K, KAMITANI Y (2019). PLOS COMPUT BIOL 15(1)

Les images (première ligne horizontale) regardées par des volontaires placés dans un appareil d'IRM sont restituées par trois algorithmes différents (lignes 2 à 4) à partir des données de neuro-imagerie enregistrées pendant leur visionnage.

pondance entre les points du cortex des aires visuelles et les coordonnées rétiniennes dans l'œil. De sorte qu'en regardant les points du cortex activés, il était possible de reconstituer des images simples — des lettres notamment — correspondant à l'empreinte neuronale de la rétine dans les aires visuelles. Depuis, l'intelligence artificielle s'en est mêlée, permettant de se servir non plus seulement de la rétine, mais de toutes les aires activées dans le cerveau.

En 2019, une équipe de l'université de Kyoto (Japon) faisait sensation avec des reconstructions du contenu perceptif du cerveau des patients à partir des données récoltées grâce à l'imagerie par résonance magnétique dite fonctionnelle (IRMf). Cette application de l'IRM classique permet de suivre presque en direct l'activité cérébrale. Presque, car ce que suit l'IRMf en réalité, ce sont les variations du flux sanguin dans les vaisseaux du cerveau. En l'occurrence, le principe est simple : des volontaires placés dans l'appareil d'IRM se concentrent sur des images qui leur sont montrées quelques secondes (un cygne, un léopard, un vitrail, un avion…), les scientifiques analysent les données d'imagerie et un algorithme d'intelligence artificielle tente de restituer les formes et couleurs de l'image en question. *« Ce qu'il y a de nouveau ces dernières années, c'est qu'on a des modèles génératifs plus puissants pour créer du texte et des images de plus en plus réalistes »*, précise Bertrand Thirion. Ces programmes ont appris, sur de vastes bases de données, à générer automatiquement des images ou des textes inédits à partir de critères défi-

nis par le texte *(lire aussi* S. et A. *n° 909)*, ou, en l'occurrence, des données de neuro-imagerie ; le plus souvent grâce à l'IRMf ou la magnéto-encéphalographie (MEG), voire par le biais d'implants cérébraux *(lire p. 60)*. Encore faut-il savoir analyser finement l'activité des différents réseaux de neurones qui participent à la perception « mentale ».

Autre expérience saisissante de ce point de vue : celle publiée dans *Scientific Reports* par des neuroscientifiques de l'université Radboud (Pays-Bas) au tout début de cette année. Eux sont parvenus à reconstruire des visages avec un réalisme stupéfiant à partir, encore, des motifs d'activation neuronale imagés par l'IRMf pendant que des volontaires regardaient des photos de visages. *« Ce sont les reconstructions de la perception des visages les plus précises à ce jour,* se réjouit Thirza Dado, première auteure de l'étude. *Mais compte tenu de la rapidité des progrès de la modélisation générative, nous nous attendons à des reconstructions encore plus impressionnantes de la perception, et peut-être même de l'imagerie mentale dans un avenir proche. À l'avenir, nous pourrons décoder et recréer des expériences subjectives, peut-être même nos rêves. Ces techniques auront aussi des applications cliniques, pour la communication avec des patients paralysés ou en état de conscience minimale notamment. Ici, nous développons des caméras à implant cérébral qui stimuleront le cerveau pour tenter de rendre la vue aux aveugles.* »

THIRZA DADO ET AL. NATURE 2022

À partir d'IRM de l'activité neuronale de deux volontaires regardant des photos de visages (ligne 1), une IA a reconstruit avec un réalisme stupéfiant ces visages (lignes 2 et 3).

La connaissance progresse, et les algorithmes ne font pas tout. Pour reconstituer ces visages, encore faut-il savoir que leur encodage neuronal avec leurs caractéristiques fines se fait dans une zone spécialisée du système visuel affectée à leur reconnaissance. Les paramètres précis sont encodés dans cette zone : forme du visage, couleur de la peau et des cheveux, orientation de la tête, illumination, port ou non de lunettes, face imberbe ou poilue, etc. C'est cela que compile et analyse l'IA pour générer ces visages. *« C'est ce que j'appelle une reconstruction sur un mode hallucinatoire,* commente Bertrand Thirion. *C'est comme si on construisait une hallucination parfaite, car l'image reconstruite n'est pas exactement ce que vous avez vu à ce moment-là, mais va ressembler aux caractéristiques attribuées dans le cerveau au visage vu : féminin, avec des cheveux longs, plus ou moins jeune, etc. Plusieurs dimensions vont aiguiller le modèle génératif.* » Mais, aussi précis et graphique que soit le visage restitué par l'IA, il sera tou-

JEAN-LUC BERTINI / PASCO

STANISLAS DEHAENE PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE*

« Le code neural est très mélangé dans le cerveau »

“Lire dans les pensées ? Nombre de résultats très impressionnants ont été publiés ces dernières années. Mais il ne faut pas surestimer ce qu'on est capable de faire. Les expériences sont menées sur des personnes volontaires, concentrées, qui acceptent de rester focalisées sur une image ou une pensée. Je ne crois pas beaucoup au fait qu'on parvienne avec des méthodes d'imagerie non invasives comme l'IRM ou la MEG à atteindre une sophistication à même de déchiffrer parfaitement le code neural. De façon générale, celui-ci est très mélangé, et plus on cherche des informations fines sur la cognition et la psychologie, plus c'est mélangé. C'est-à-dire que les groupes de neurones sont de plus en plus petits et distribués dans le cerveau. Mais en admettant qu'on perfectionne ces techniques au point qu'elles puissent décoder à la demande le contenu cognitif d'une personne, cela engagera des questions d'éthique sérieuses, et pour tout dire très compliquées.”

* Titulaire de la chaire Psychologie cognitive expérimentale. Il est également responsable de l'unité de recherche en neuro-imagerie cognitive au NeuroSpin de Paris-Saclay.

jours légèrement faux. « *On hallucine en quelque sorte l'expérience psychologique de la personne à partir de son imagerie cérébrale* », explique le chercheur.

50 tâches cognitives cartographiées et décodables

Aussi impressionnantes que soient ces expériences, elles ne servent *in fine* qu'à valider les connaissances acquises, confirmant par une mesure objective ce que les scientifiques ont réussi à déchiffrer dans l'activité cérébrale. L'objectif est bien de comprendre comment œuvrent les fonctions cognitives distribuées dans le cerveau. Or, ces expériences se concentrent sur des tâches très particulières. C'est pourquoi l'équipe Inria-CEA Mind et le centre NeuroSpin en France se focalisent désormais sur un défi à la fois plus basique et plus complexe : « *Apprendre à deviner ce que fait un sujet à un instant T, sans rien présupposer, à partir des données d'imagerie seules* », résume Bertrand Thirion. Avec son équipe, le chercheur a publié en avril dans *Scientific Reports* un recensement de 50 tâches cognitives cartographiées et décodables : mouvements des orteils et des doigts, à gauche ou à droite, reconnaissance des visages mais aussi des émotions faciales, calcul mental, prise de décision, reconnaissance des phrases, compréhension d'une histoire… « *On a démontré pour la première fois qu'un décodage totalement ouvert, qui n'anticipe aucune activité précise, permet de deviner à peu près ce que la personne fait, mentalement ou effectivement, parmi ces 50 activités cognitives.* » Pour troublante qu'elle soit, cette compréhension de plus en plus fine de l'activité cérébrale ouvre la voie à des applications qu'on peine encore à concevoir. Tant que les finalités resteront strictement scientifiques ou médicales, tout ira bien. Mais la perspective de technologies capable de percer à jour le contenu conscient d'un cerveau et, grâce à des implants, de le modifier a de quoi fasciner autant qu'inquiéter. ■

H. J. @HugoJaliniere

PATRICK ALLARD/REA

NeuroSpin, plateforme de neuro-imagerie à Saclay (Essonne), possède le plus puissant appareil d'IRM au monde, qui permet d'observer finement l'activité cérébrale.

TECHNIQUES

À la recherche de la neuro-imagerie parfaite

Pour s'approcher au plus près des neurones en activité, les scientifiques disposent de deux techniques non invasives : l'IRM fonctionnelle, qui possède une résolution spatiale de l'ordre du millimètre, permettant un découpage fin du cerveau en environ un million de points ou voxels (pixels 3D). En revanche, l'activité des neurones étant captée indirectement, l'information est enregistrée en léger différé, à deux ou trois secondes près. Cela convient quand une personne est exposée à une image fixe, mais pas pour les transitions rapides qu'implique par exemple la compréhension d'un langage. C'est là que la magnéto-encéphalographie (MEG) devient pertinente, car en se concentrant sur les ondes électromagnétiques émises par les neurones, elle permet d'enregistrer ce qui se passe à la milliseconde près. En revanche, le signal électrique capté par les électrodes sur le cuir chevelu étant déformé par la boîte crânienne, la résolution spatiale est de l'ordre du centimètre. Pour obtenir à la fois une résolution au millimètre et une captation du signal à la milliseconde, restent les électrodes implantées dans le cerveau, notamment chez les épileptiques équipés contre les crises. Mais, alors, seule une petite région est enregistrée et la vue globale du cerveau est perdue. En théorie, pour déchiffrer parfaitement ce code neural, il faudrait disposer d'une technique captant l'ensemble du cerveau tout en ayant une résolution au neurone près et un délai d'acquisition de l'image de l'ordre de la milliseconde ; quasiment un jumeau numérique en 4D évolutif. À moins de découper le cerveau en tranche pour utiliser la microscopie, il est encore impossible d'atteindre une telle résolution. Et quand bien même, avec environ 100 milliards de neurones dans un cerveau, la quantité d'informations serait probablement ingérable.

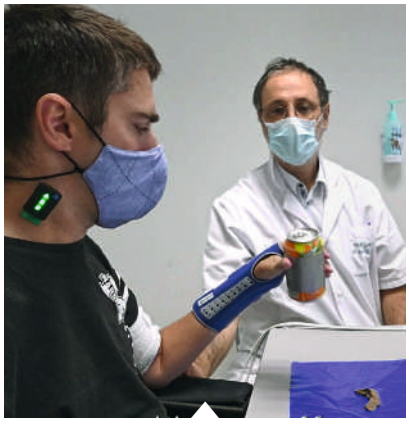
Soigner

Décrypter le cerveau pour faire parler les corps paralysés

Des personnes totalement paralysées parviennent à communiquer grâce à des interfaces informatiques contrôlées par la pensée. Et des neuroprothèses permettent à d'autres patients de retrouver l'usage de certains membres… Décryptage des dernières innovations.

« *Veux-tu regarder Robin des Bois de Disney avec moi ?* » Ce message adressé à un petit garçon de 4 ans s'affiche sur l'écran scruté par les chercheurs du centre Wyss de Genève (Suisse). Il provient du père de l'enfant, un homme de 34 ans totalement paralysé par la maladie de Charcot, y compris dans ses mouvements oculaires. S'il a réussi à s'exprimer, c'est grâce à un implant cérébral connecté à l'ordinateur. Ce type de système, nommé interface cerveau-machine ou ICM, permet de contrôler un programme informatique par la pensée. Cette première annoncée en mars a ouvert des perspectives inédites dans le décodage du langage des neurones au profit des patients atteints d'un syndrome d'enfermement (*locked-in syndrome*) complet, un état où le malade est conscient mais incapable d'effectuer le moindre mouvement.

Ici, les scientifiques ont d'abord implanté deux électrodes dans le cortex moteur du cerveau du patient. S'en est suivie une longue série de tests. Durant plus de cent jours, l'homme apprend à activer ces électrodes, probablement en imaginant un mouvement oculaire, de façon à sélectionner les lettres qui lui étaient énumérées dans l'oreille. Les premiers messages font part de nécessités physiques : « *Pas de chemise mais des chaussettes* » pour la nuit, et « *tête toujours droite* ». Puis viennent des pensées moins concrètes : « *Je voudrais écouter fort l'album des Tool* [groupe de métal californien] », demande-t-il le 245e jour. « *C'est la première fois qu'on parvient à communiquer avec une personne qui n'a plus de mouvement volontaire et dont l'interface est le seul moyen de communication* », se réjouit le neuroscientifique Jonas Zimmermann, premier coauteur de ces travaux publiés dans *Nature Communications*.

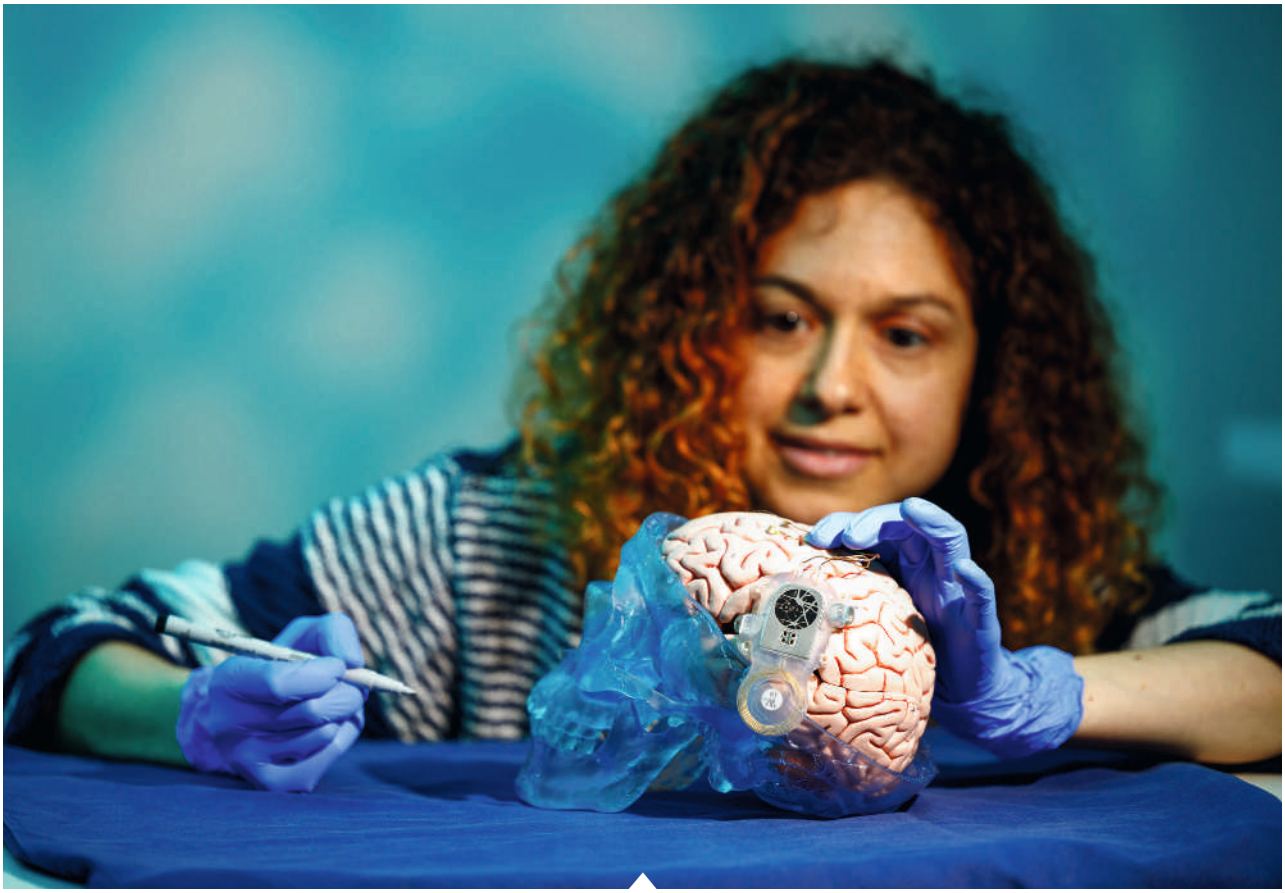


COURTESY INRIA SERVICE DE PRESSE

Ce patient paralysé attrape une canette grâce aux électrodes implantées au-dessus de son coude et commandées par un boîtier sur son épaule (projet Agilis).

Objectif : décoder la parole en temps réel

Mais le chemin vers une conversation fluide reste encore long : avec cette écriture mentale lettre par lettre, le patient n'arrivait à former qu'un seul caractère par minute, contre 150 mots par minute lors d'un échange oral classique. Aussi, l'équipe travaille sur un système sans fil entièrement implantable. À ce jour, il n'a été installé que sur des modèles animaux. Nommé Ability, il « *réduit les risques d'infection et améliore la facilité d'utilisation* », détaille Jonas Zimmermann. Avec l'espoir de détecter



WYSS CENTER

L'implant cérébral du système Ability pourrait un jour restaurer communication et mouvement chez les patients paralysés. Il se connecterait sans fil à un ordinateur commandant la prothèse ou synthétisant la voix.

et de traiter des signaux provenant de zones très spécifiques ou plus vastes du cerveau pour décoder la parole en temps réel, couplant le dispositif à des systèmes vocaux pour une communication plus naturelle.

L'équipe suisse n'est pas la seule à creuser cette piste. À l'université de Californie à San Francisco (États-Unis), des scientifiques ont mené une expérience similaire sur une personne souffrant non pas de paralysie, mais d'anarthrie, une incapacité à articuler les mots. Avec une approche un peu différente : les chercheurs se sont concentrés sur le contrôle des muscles permettant la parole. Grâce à une cartographie cérébrale de ces muscles mise au point sur cinq patients épileptiques en 2019, leur système transforme les signaux neuronaux en mouvements d'articulation du canal vocal, eux-mêmes transformés en phrases parlées. Pour y parvenir, ils ont développé un algorithme qui détermine le mot que le patient cherche mentalement à épeler en utilisant l'alphabet phonétique de l'Otan (« alpha » pour A, « bravo » pour B…) parmi une liste de 1152 mots courants. Concrètement, ils ont placé des électrodes sur des puces mises en contact avec plusieurs régions du cortex cérébral impliquées dans le traitement de la parole. Les résultats sont spectaculaires. Le système permet de transcrire 29 mots par minute, avec un taux d'erreur de 6 %. Et ce n'est pas tout. *« Grâce à des simu-*

WYSS CENTER

« C'est la première fois qu'on parvient à communiquer avec une personne qui n'a plus de mouvement volontaire »

Jonas Zimmermann, neuroscientifique au centre Wyss à Genève (Suisse)

lations hors ligne, nous avons validé cette approche avec des vocabulaires de plus de 9000 mots courants, ce qui permet une communication générale, affirment les chercheurs. *Ces résultats illustrent la viabilité des tentatives de contrôle de la parole lors d'une paralysie complète des voies vocales, comme le* locked-in syndrome. » Ces patients prisonniers de leur corps *« sont ceux qui profiteront le plus d'interfaces cerveau-machine consacrées à la communication* », confirme Jonas Zimmermann. Des interfaces qui, à défaut de parole, peuvent permettre de retrouver la capacité d'écrire « à la main ». Cette approche a été testée dès 2019 à l'université Stanford (États-Unis) sur un patient paralysé jusqu'au cou. *« Le cerveau conserve sa capacité à commander des mouvements fins une décennie entière après que le corps a perdu sa capacité à exécuter ces mouvements* », assure Frank Willett, le premier auteur de ces travaux. Pour exploiter cette imagerie motrice résiduelle, les chercheurs ont, là aussi, utilisé une méthode moins invasive que l'implantation d'électrodes en profondeur : ils ont juste disposé deux puces de 100 électrodes contre le cerveau, à proximité de la zone du cortex moteur responsable des mouvements de la main. De sorte qu'en imaginant écrire chaque lettre, le patient active les mêmes zones motrices du cerveau que s'il pouvait effectivement écrire. Les puces captent ces signaux neuronaux et les transmettent à l'ordinateur, dans lequel un algorithme les convertit en probabilités que chaque lettre soit écrite. Avec ce système, le participant *« a atteint des vitesses de frappe qui dépassent celles de toutes les autres interfaces cerveau-machine rapportées à ce jour* », s'enthousiasment les scientifiques. L'homme écrit au rythme de 90 caractères par minute avec une précision passant de 94 à 99 % avec l'ajout d'un correcteur automatique. Soit un score comparable aux 115 mots par minute écrits en moyenne par une personne valide sur un smartphone.

BRAINGATE

« Le cerveau conserve sa capacité à commander des mouvements fins une décennie après la paralysie du corps »

Frank Willett, chercheur au Laboratoire translationnel de prothèses neurales, à l'université Stanford (États-Unis)

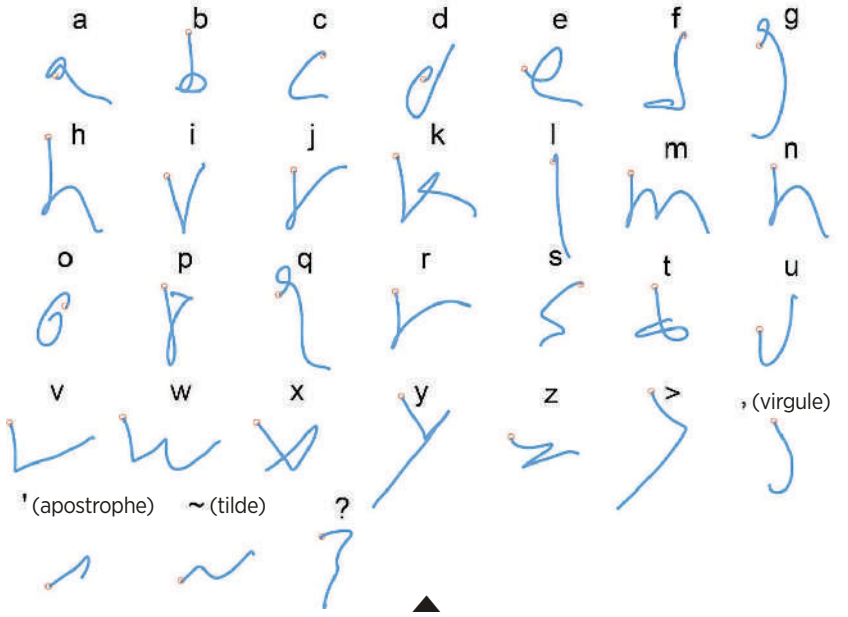
Des neuro-implants rendent l'usage des mains

Déclinées hors du cerveau, ces approches décodant le système nerveux pourraient permettre aux patients paralysés de retrouver non seulement la parole, mais aussi le geste. À commencer par les membres supérieurs, plus essentiels à leur quête d'autonomie que le retour de la marche. *« Je serais prêt à donner mes jambes pour récupérer mes bras* », avoue un tétraplégique à la caméra de l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). Pendant un mois, le projet français Agilis lui a permis de bénéficier d'un neuro-implant lui rendant l'usage de ses mains. *« Ces patients se déplacent de manière*

SANTÉ MENTALE

Améliorer la mémoire ou enrayer une dépression

« *Notre but est de retarder la maladie d'Alzheimer* », anticipe le neuroscientifique Robert Hampson, de la Wake Forest University School of Medicine (États-Unis). Dans des travaux publiés cette année, son équipe a utilisé une neuroprothèse pour améliorer la mémoire de patients épileptiques. C'est dans la restauration de la fonction de l'hippocampe, qui permet l'encodage de nouveaux souvenirs, que réside la clé. *« L'hippocampe est gravement touché dès les premiers stades de la maladie d'Alzheimer* », explique Robert Hampson. En reproduisant la séquence d'impulsions électriques produite par l'hippocampe au moment de l'encodage d'un nouveau souvenir, les électrodes placées dans le cerveau des patients en améliorent l'efficacité. *« Nous avons constaté une amélioration des tests de mémoire allant jusqu'à 50 %* », se réjouit le neuroscientifique. Pendant ce temps, à l'université de Californie (États-Unis), c'est la dépression sévère d'une patiente qu'une équipe parvient à maîtriser. Les zones du cerveau dysfonctionnelles dans la dépression varient. La première électrode a été placée dans la zone cérébrale dont l'activité était la plus anormale chez la patiente, à savoir dans le striatum ventral, et la seconde dans l'amygdale, impliquée dans le contrôle des émotions. Lorsque cette dernière électrode détectait une activation anormale, l'implant sur son crâne envoyait une impulsion au striatum ventral pour enrayer les symptômes. *« Ce dispositif a été une bénédiction* », témoigne la patiente.



© NATURE, JAIMIE HENDERSON ET AL.

Un patient a imaginé écrire ces lettres à la main. Grâce à son implant cérébral, l'ordinateur a décodé les signaux et affiché les lettres (en bleu) (université Stanford, États-Unis).

plus sûre et plus efficace en fauteuil qu'avec la marche rudimentaire qui peut leur être offerte avec les techniques actuelles de neuro-implants, explique le Dr Charles Fattal, médecin-chef au centre de rééducation fonctionnelle de Perpignan. *En revanche, au niveau des bras, les patients tétraplégiques n'ont rien, aucune préhension.* »

Chez ces patients, le décryptage des messages du cerveau vers les membres permet de rétablir leur transmission. En clair, redonner la mobilité aux patients en court-circuitant la partie lésée. Le projet Agilis consiste à implanter deux longues électrodes juste au-dessus du coude, enroulées autour des nerfs médian et radial. Elles permettent de commander sélectivement huit groupes de muscles de l'avant-bras et de la main grâce à leurs multiples points de contact sur les fibres nerveuses.

Sur le bras non appareillé, les deux patients tétraplégiques participant à l'expérience ont conservé une épaule fonctionnelle. En l'avançant ou en la soulevant, le stimulateur qui y est fixé permet d'ouvrir et fermer la main paralysée en commandant les électrodes. Ils parviennent ainsi rapidement à attraper une canette ou une clé, et même à porter une bouteille contenant une paille à leur bouche pour y boire. « *Je ne m'attendais pas à pouvoir aussi rapidement attraper un objet, c'est assez émouvant* », se souvient l'un d'eux.

Boire et manger tout seul en commandant ses électrodes

Pour les patients n'ayant pas l'usage de leur épaule, d'autres types de commandes, vocale ou par boutons-poussoirs, sont aussi envisagés. Cet exploit avait été réalisé pour la première fois aux États-Unis en 2017. Un patient était alors parvenu à boire et manger tout seul en commandant ses électrodes, cette fois avec un implant cérébral. Mais au lieu de commander deux électrodes enroulées dans le bras, l'implant en activait 36, une dans chaque muscle du bras et de la main impliqués dans la préhension. « *Ce sont des chirurgies longues et avec un haut risque d'infection* », tempère Charles Fattal.

Ces techniques, bien que faisant l'objet de plus en plus de travaux, ne transformeront pas le quotidien de ces patients avant plusieurs années, le temps d'être perfectionnées, testées, mises au point et commercialisées. En 2021, on estimait à seulement 35 le nombre de patients paralysés implantés d'une interface cerveau-machine sur le long terme dans le monde. Les patients participant aux études bénéficient d'un suivi psychologique afin de supporter le retrait de leurs neuroprothèses et ICM après le temps de l'étude. « *Je sais très bien qu'au bout d'un mois on me retirera les électrodes, mais j'aurai participé à la recherche* », concède un des patients du projet Agilis. Témoignage d'un acteur à part entière de ces travaux pionniers pour ceux dont le corps ne répond plus au cerveau. ■

C. G. @CamilleGaubertb

ÉTUDE

Retrouver le sens du toucher

Recouvrer le mouvement, c'est la promesse des interfaces cerveau-machine, mais qu'en est-il de sa précision ? *« Pour des gestes plus aboutis, la technologie doit être affinée »*, estime David Guiraud, de la start-up Neurinnov, qui commercialisera le système issu du projet Agilis, un dispositif médical restaurant partiellement les mouvements de main chez des patients paralysés des avant-bras. Avec l'objectif de rendre à ces personnes un simili-sens du toucher, par exemple en leur faisant ressentir des vibrations. À l'université de Pittsburgh (États-Unis), dans des travaux publiés en 2021, des chercheurs ont testé un bras robotique muni de capteurs sensibles à la pression. Contrôlé par le patient, ce bras envoie les informations sensorielles à son cerveau par des électrodes implantées dans son cortex somatosensoriel. Le patient tétraplégique de l'étude parvient ainsi à diminuer de moitié le temps nécessaire pour attraper un objet, passant de 20 à 10 secondes.

ÉTHIQUE

BERNARD BAERTSCHI
MEMBRE DU COMITÉ D'ÉTHIQUE DE L'INSERM*

Nos pensées ne peuvent être décodées qu'avec notre consentement

"Des lunettes pour lire dans la pensée ! C'est ce dont dispose le héros d'une BD que je lisais dans ma jeunesse, Bibi Fricotin, qu'il utilise pour découvrir les pensées secrètes des habitants de son quartier, notamment le fantasme de sa concierge qui s'imagine en princesse. On s'en amuse tant qu'on ne se met pas à la place de la concierge, car alors, c'est un mélange d'horreur et d'indignation qui nous saisit devant une telle violation de l'intimité. Préserver la vie privée est la première exigence éthique rencontrée lorsqu'on parle de décoder les pensées. Cela nous tient à cœur parce que, sans vie privée, notre autonomie et notre liberté sont entravées, parce que nous craignons d'être stigmatisés ou discriminés sur la base de nos opinions, et surtout parce que nous voulons préserver de toute intrusion ce sanctuaire qu'est notre cerveau. On répondra que la lecture des pensées d'autrui n'est qu'un fantasme et donc que, ici comme souvent, une bioéthique prospective peint le diable sur la muraille, avec le risque d'entraver les progrès de la recherche. Je concède que c'est parfois le cas, mais ici, on n'en est plus au fantasme. Surtout, notre pensée commence à être décodée, même si cela demande au minimum une encéphalographie, un appareillage autrement plus encombrant que les lunettes de Bibi Fricotin. Est-ce vraiment un mal ? Pour évaluer une technologie, il est nécessaire d'en peser tant les risques que les bénéfices et de ne pas céder à la panique morale qui nous pousse à énoncer des interdictions catégoriques. Or, des bénéfices, il y en a. Pensons d'abord à la détection des mensonges. Pas dans la vie ordinaire, bien sûr, mais en matière criminelle. Découvrir les coupables et ne pas emprisonner les innocents est crucial pour la justice. On soutiendra peut-être que mentir fait partie des droits de l'inculpé et donc que son intimité mentale doit être préservée. Mais on ne niera pas que le fait de pouvoir décoder les pensées de personnes cérébrolésées incapables de communiquer soit un bénéfice. Ainsi, des interfaces cerveau-machine ont permis de nous rendre compte que des personnes en état minimalement conscient avaient été diagnostiquées à tort en état végétatif. On communique encore avec des personnes souffrant d'un syndrome d'enfermement (*locked-in*). Ici, décoder la pensée permet de mieux respecter l'autonomie de ces patients. Et puis, seuls communiquent ceux qui le veulent. C'est là ce qui doit rester la pierre de touche en éthique : lorsqu'il est question de notre intimité, de nos pensées donc, et plus généralement de notre vie mentale, c'est la volonté de la personne concernée qui doit rester l'instance décisive, avec l'octroi ou le refus de son consentement. Même lorsqu'il s'agit de criminels présumés : rester opaque est une prérogative de tout être humain ; cette intimité ultime doit être préservée." ■

CHRISTOPH DE BARRY / HANS LUCAS

Il faut peser les risques autant que les bénéfices pour ne pas céder à la panique morale

Propos recueillis par H. J.

* Maître d'enseignement et de recherche à l'institut Éthique histoire humanités de l'université de Genève (Suisse). Il est aussi l'auteur de La Neuroéthique, ce que les neurosciences font à nos conceptions morales (éditions La Découverte).

Améliorer

Des capacités cérébrales augmentées

Mémoire, concentration, endurance… Les interfaces cerveau-machine pourraient améliorer certaines fonctions cognitives. Plusieurs méthodes sont à l'étude, de la stimulation magnétique transcrânienne à la pose d'un implant dans le cerveau.

Les neurotechnologies ne se limitent pas à réparer le cerveau, elles pourraient même l'améliorer ! C'est l'un des fantasmes du mouvement transhumaniste, qui envisage l'avènement d'un être humain biologiquement augmenté par la technologie. Fantasme qui pourrait bien devenir prochainement réalité grâce — ou à cause — du milliardaire Elon Musk et son entreprise Neuralink. L'objectif affiché de la start-up fondée en 2016 est de connecter le cerveau humain à des appareils tels que des ordinateurs ou des téléphones portables. Pour cela, un implant serait installé dans le cortex cérébral, envoyant et recevant de l'information entre nos neurones et les machines. Une interface cerveau-machine (ICM) qu'Elon Musk voudrait coupler à de l'intelligence artificielle pour décupler nos capacités cognitives. Pour réussir son pari, le fondateur de SpaceX et Tesla a tout misé sur la technologie, concevant des implants beaucoup plus avancés que ceux créés par ses concurrents. La puce, testée sur des cochons en 2020 puis des singes en 2021, mesure 23 mm de large pour 8 mm d'épaisseur et se recharge par induction, sans fil. Insérée dans le cerveau par un robot chirurgical avec une technique proche de celle d'une machine à coudre, elle est composée de 1024 fibres porteuses d'électrodes. Ces avancées devraient rendre son installation plus sûre et éviter ainsi les risques liés à ce genre de dispositif cérébral *(lire l'encadré p. 67)*. Mais l'implant de Neuralink n'a jamais été testé chez des humains, et les expériences réalisées chez les primates — dont un capable de maîtriser le jeu vidéo Pong « par la pensée » — montrent que la technique n'est pas parfaite, au point que la compagnie est actuellement poursuivie en justice pour maltraitance animale.

Mais il n'y a pas forcément besoin d'avoir un implant dans le cerveau pour communiquer avec les machines. D'autres approches moins invasives sont déjà uti-

NEURALINK

L'implant développé par Neuralink, inséré dans le cortex cérébral, n'a pour l'instant été testé que chez l'animal.

YOUTUBE/POLITECHNIKA OPOLSKA

« Tout ce qu'on contrôle actuellement avec la voix le sera par nos pensées grâce à ces interfaces »

Aleksandra Kawala-Sterniuk, chercheuse à l'université technologique d'Opole (Pologne)

lisées pour convertir l'activité cérébrale en commandes numériques. La technique la plus utilisée est l'électroencéphalogramme (EEG), qui capte l'activité cérébrale par des électrodes placées sur le cuir chevelu. Ces signaux sont ensuite transférés à un récepteur qui les transforme en signal électrique pouvant être lu par un ordinateur, lui-même connecté à une machine. Ainsi, le système pourrait par exemple détecter si une personne se réveille et envoyer l'information à sa machine à café pour qu'un espresso l'attende dans la cuisine après sa douche ! « *Dans le futur proche, ces systèmes seront accessibles à tout le monde, tels les smartphones aujourd'hui,* prévoit Aleksandra Kawala-Sterniuk, chercheuse spécialisée dans les interfaces cerveau-ordinateur à l'université technologique d'Opole, en Pologne. *Ils seront faciles à porter, intégrés aux vêtements, par exemple. Et ils deviendront l'équivalent des assistants de commande vocale comme Siri : tout ce qu'on peut contrôler actuellement avec la voix pourra l'être par nos pensées grâce à ces interfaces, notamment les applications de divertissement.* »

Ajouter de nouveaux sens ou de nouvelles fonctionnalités

La technologie permettrait ainsi d'ajouter de nouvelles fonctionnalités au cerveau, comme aujourd'hui on ajoute des applications à nos smartphones. Il y en a même qui ont déjà réussi à s'adjoindre de nouveaux sens ! C'est le cas de l'artiste britannique Neil Harbisson, inventeur d'une antenne transformant les couleurs en fréquences sonores, faisant vibrer les os de son crâne jusqu'à stimuler son oreille interne, ce qui lui permet d'entendre la couleur ! « *Ce n'est pas une amélioration ou une augmentation de quelque chose que nous avons déjà, mais l'addition d'un nouveau sens, quelque chose que personne d'autre n'avait. Une nouvelle façon de percevoir la réalité, parce que c'est ça le but de l'art, nous montrer une autre vision du monde* », explique cet artiste qui utilise ce nouveau sens pour ses œuvres d'art. Avec un avantage supplémentaire : à l'inverse des organes biologiques, ceux artificiels peuvent être continuellement améliorés. L'antenne de Neil Harbisson en est un bon exemple. Quand il l'a créée en 2004, elle percevait 25 couleurs. Aujourd'hui, elle restitue les 360 couleurs visibles par l'œil humain, mais aussi l'ultraviolet et l'infrarouge !

Une autre possibilité est d'augmenter les capacités du cerveau en stimulant des zones spécifiques, notamment pour accroître l'attention, la mémoire, la vigilance, voire les capacités de raisonnement. Tout un domaine a même émergé dans ce but : la neuro-ergonomie. Celle-ci consiste à suivre l'activité cérébrale par électroencéphalographie et, si une baisse est observée, par exemple quand la personne commence à fatiguer, une zone spécifique du cerveau est stimulée pour rehausser l'activité dans cette zone.

MATTHIEU GAFSOU/MAPS

L'antenne mise au point par l'artiste Neil Harbisson lui permet d'entendre les couleurs en transformant celles-ci en fréquences sonores.

Des approches qui manquent encore de précision

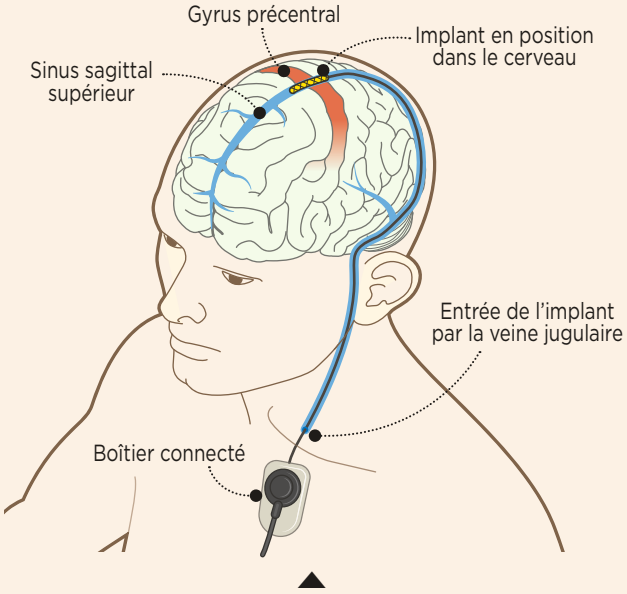
La technologie la plus étudiée pour cela est la stimulation magnétique transcrânienne (TMS), qui utilise un champ magnétique pour transmettre un courant électrique à une zone spécifique du cortex cérébral. À la différence des électrochocs d'antan, ces courants ne sont pas douloureux et parviennent à déclencher des influx nerveux dans les neurones de la zone ciblée. « *Cette technique a été testée avec succès chez des contrôleurs de trafic aérien pour améliorer leur attention,* révèle Caterina Cinel, chercheuse en neurosciences et génie neural à l'université d'Essex, au Royaume-Uni. *Mais la TMS n'est pas très précise : la zone stimulée étant trop large, il est impossible de savoir quand on stimule et quand on inhibe l'activité neuronale. En somme, on ne connaît pas vraiment son fonctionnement ni durant combien de temps elle parvient à stimuler le cerveau.* »

D'autres approches plus précises existent, comme la stimulation transcrânienne à courant direct, dont l'utilisation est aussi plus pratique (l'appareil étant moins encombrant que celui pour stimulation magnétique transcrânienne). « *On peut même trouver ces dispositifs sur Amazon ! Mais leur utilisation en dehors des laboratoires est vivement déconseillée, car on ne connaît pas les conséquences sur le cerveau d'une stimulation régulière,* alerte Caterina Cinel. *Néanmoins, c'est une technologie plus envisageable dans le futur proche que la TMS.* » Le plus précis encore serait de stimuler le cerveau

TECHNOLOGIE

Les limites des implants cérébraux

Lire ou stimuler le cerveau est beaucoup plus simple si les électrodes sont au plus près de celui-ci. Plus on s'en éloigne, plus le signal de l'activité cérébrale devient flou. C'est pourquoi la start-up américaine Neuralink mise tout sur ses implants cérébraux, installés au contact direct du cortex. Mais ces dispositifs implantés dans le cerveau ne sont pas encore viables. D'abord, leur installation implique une chirurgie à cerveau ouvert, avec des risques d'infections, d'hémorragies, sans oublier d'éventuelles atteintes involontaires à cet organe vital. Des risques importants qui pourraient se justifier pour soigner une maladie grave, mais qui sont difficilement envisageables chez quelqu'un en bonne santé. De plus, il faudrait remplacer ces dispositifs régulièrement, car ils ont une durée de vie réelle d'environ un an. Avec le temps, il y a une accumulation de tissu fibreux autour des électrodes, causée par le décalage existant entre la rigidité de l'électrode et la souplesse du tissu cérébral, qui entraîne une friction constante, et donc une inflammation chronique. La sensibilité de l'appareil baisse ainsi assez rapidement. Mais une nouvelle approche pourrait rendre ces implants cérébraux viables. Des chercheurs australiens ont inventé en 2021 une méthode pour implanter les électrodes en passant par les vaisseaux sanguins du cerveau *(voir schéma)*. Elles sont donc placées à un endroit précis, mais sans pour autant être en contact direct avec le tissu cérébral, évitant les problèmes d'inflammation.



Cet implant évite de recourir à la chirurgie à cerveau ouvert puisqu'il est introduit sous le crâne par une veine du cou.

BRUNO BOURGEOIS

directement de l'intérieur, comme cela se fait pour traiter les tremblements de la maladie de Parkinson ou empêcher les crises chez les épileptiques sévères. Ainsi, des chercheurs peuvent parfois profiter de ces dispositifs déjà en place pour tester la stimulation de zones très précises du cerveau, notamment pour améliorer la mémoire. *« Mais c'est une approche beaucoup trop invasive, qui de plus est complexe, car la stimulation est cette fois trop précise : une fois installé, l'implant ne stimulera que la région où il se trouve, donc il faut savoir exactement où le placer,* ajoute-t-elle. *Les techniques non invasives sont beaucoup plus flexibles à cet égard. »*

Pour le moment, ces technologies non invasives de stimulation cérébrale sont expérimentales, mais nombre d'experts les voient devenir réalité dans les prochaines décennies. *« Nous ne maîtrisons pas encore ces technologies, elles ne sont pas assez précises, donc nous ne contrôlons pas ce qui est stimulé,* note Caterina Cinel. *Aussi, notre attention comme nos ressources cérébrales étant limitées, il existe un risque que la stimulation d'une fonction cognitive diminue en même temps l'efficacité d'autres fonctions. Par exemple, qu'une activité comme parler devienne plus difficile si notre attention est augmentée et focalisée sur une autre activité. Mais je pense que d'ici à vingt ans nous pourrions utiliser ces stimulations dans la vie de tous les jours : si on se sent fatigué, mais qu'on sait qu'on a encore beaucoup de travail à faire, un peu de stimulation cérébrale pourrait nous aider. »* La course à la performance est lancée, mais on aura besoin de moins de café. ■ **N. G. C.** @n6g6c

D'ici à vingt ans, il sera sans doute possible d'utiliser ces stimulations dans la vie de tous les jours

Cancer du poumon, l'urgence du dépistage

Le suivi régulier par scanner à faible dose permettrait d'éviter 10 000 morts par an en France. Car les preuves scientifiques se multiplient de l'intérêt d'une intervention précoce dans des groupes à risque, c'est-à-dire chez les plus de 50 ans, fumeurs et ex-fumeurs. Explications.

Changement de cap pour le cancer du poumon. Très attendu et réclamé depuis plusieurs années par les spécialistes, son dépistage organisé à l'échelle nationale est enfin sur les rails, comme l'a précisé l'Institut national du cancer (Inca) lors d'un colloque à Paris début octobre. Car oui, il est possible d'éviter 10 000 morts par an en France, celles dues à une affection responsable de la première cause de décès par cancer. Comment ? Par un dépistage régulier par scanner dit faible dose dans des groupes à risque, les plus de 50 ans fumeurs et ex-fumeurs. Il reste toutefois à préciser les modalités pratiques de sa mise en œuvre sur l'ensemble du territoire. Selon l'avis de la Haute Autorité de santé (HAS) rendu en 2022, il permettrait de sauver cinq vies pour 1000 personnes dépistées. *« La France est clairement en train de rattraper son retard,* précise le Pr Sébastien Couraud, des Hospices civils de Lyon. *Un groupe de travail est en cours de formation et la mise en place d'un dépistage organisé, comme pour le sein, l'utérus et le colon, devrait être effective en 2027.* »

45 000 nouveaux cas par an en France

Quelques chiffres pour bien comprendre les enjeux. Chaque année, le cancer du poumon est responsable dans le monde de 2 millions de cas et de 1,8 million de décès, dont 45 000 nouveaux cas et plus de 33 000 décès en France. Principal responsable : le tabac pour 85 % des cas. Les 15 % restants sont dus à la pollution atmosphérique, comme le suggère un récent travail *(lire* S. et A. *n° 909)*, la génétique et l'exposition à des substances chimiques et physiques (amiante, irradiation…).

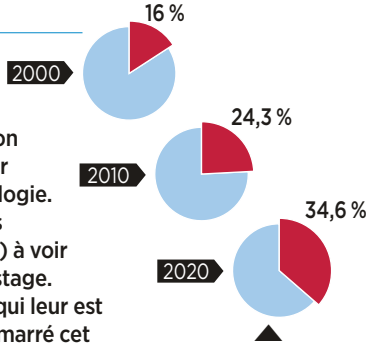
Aujourd'hui, le « taux moyen » de survie à cinq ans, c'est-à-dire le nombre de personnes encore en vie cinq ans après le diagnostic, tous stades confondus — il en existe quatre — est de 20 %.

ÉTUDES

Toujours plus de femmes

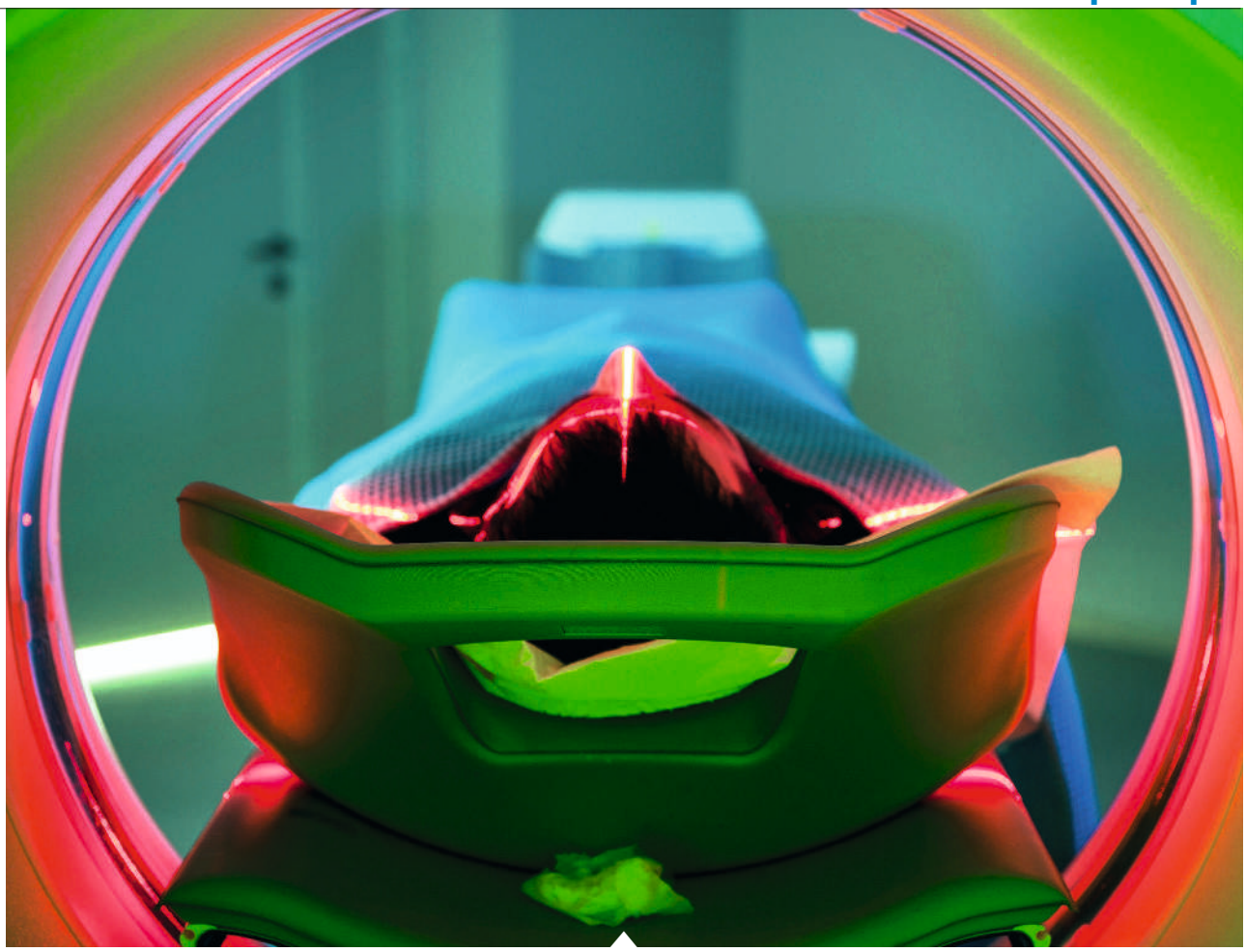
Le taux de femmes concernées par le cancer du poumon a été multiplié par deux en dix ans, selon l'étude nationale KBP-2020 présentée en janvier dernier lors du 26e congrès national de pneumologie. Mais d'après l'étude Nelson, elles sont aussi plus nombreuses que les hommes (33 % contre 24 %) à voir diminuer leur risque de mortalité grâce au dépistage. C'est l'un des intérêts du programme Cascade* qui leur est entièrement consacré. Promu par l'APHP, il a démarré cet été à Béthune, Grenoble, Paris et Rennes, et prévoit d'inclure 2400 volontaires. Près de 500 femmes ont déjà été recrutées.

* Pour participer : 06.15.06.58.35 du lundi au vendredi ; cascade.cch@aphp.fr



Proportion de femmes atteintes d'un cancer du poumon en France.

BRUNO BOURGEOIS. SOURCE : ÉTUDE KBP



GETTY IMAGES

Une répétition régulière de scanners du poumon chez les personnes à risque permet de mettre en évidence des nodules. Selon leur évolution et leur temps de doublement, on peut intervenir précocement si besoin.

Pourquoi un chiffre si faible ? Parce que, dans plus d'un cas sur deux, le cancer est découvert à un stade trop avancé, avec des métastases souvent déjà présentes. En effet, la toux, la fatigue et l'amaigrissement ne sont pas des signes spécifiques. De plus, les poumons n'étant pas innervés, la maladie peut rester longtemps asymptomatique. Mais ce taux de survie « moyen » de 20 % cache des disparités très importantes. *« De 5 % en cas de découverte au stade 4, il est de 80 % pour le stade 1 »*, précise le Pr Charles-Hugo Marquette, du CHU de Nice. Et c'est bien là tout l'enjeu du dépistage : repérer le plus tôt possible une tumeur quand elle est encore opérable, avant l'apparition de métastases, pour que les patients aient rapidement accès aux traitements *(lire l'encadré p. 70)*. Or, les scientifiques disposent désormais de solides preuves de l'intérêt d'une intervention précoce dans des groupes à risque, c'est-à-dire chez les plus de 50 ans, fumeurs actifs ou répondant à des critères bien précis (ayant fumé plus de 15 cigarettes par jour pendant plus de 25 ans ou plus de 10 cigarettes par jour pendant plus de 30 ans, ou avoir arrêté depuis moins de 10 ans).

Ces preuves, ce sont deux vastes études, l'une américaine dite NSLT (National Lung Screening Trial) menée sur près de 55 000 personnes, l'autre européenne, Nelson, conduite auprès de 8000 patients. Respectivement publiées en 2011 et 2020, toutes deux dans la revue *The New England Journal of Medicine*, leurs résultats sont concordants et attestent d'une réduction de 20 % de la mortalité par cancer dans les groupes ayant régulièrement passé les scanners. Ce qui correspond pour la France — où l'on estime à 2 millions le nombre de personnes éligibles au dépistage — à environ 10 000 morts évitées chaque année.

La répétition régulière des scanners (dont le rythme de surveillance est toujours en débat : une fois par an ? tous les deux ans ? pendant combien d'années ?) a pour but de mettre en évidence au niveau des pou-

85%
des cas sont dus au tabac.

33 000 décès par an.

67 ans : âge moyen du diagnostic.

12,6 % des cas chez les non-fumeurs en 2020.

THÉRAPEUTIQUES

Vers des traitements combinés

En complément de la chirurgie, de la chimiothérapie et de la radiothérapie, les thérapies ciblées et l'immunothérapie viennent enrichir un arsenal de lutte contre le cancer du poumon de plus en plus efficace.

Un vrai changement. « *Impensable il y a encore quelques années, il est aujourd'hui possible, même en présence de métastases, de contrôler l'évolution de la maladie pendant près de dix ans* », insiste le Pr Christos Chouaid, pneumologue au Centre hospitalier intercommunal de Créteil. En effet, face à cette entité multiple que sont « les » cancers du poumon (il en existe près de 100 types différents, le plus fréquent est celui dit non à petites cellules, CPNPC), des progrès considérables ont été réalisés. Résultat : le pronostic hier encore très sombre ne cesse de s'améliorer. Classiquement, trois approches, parfois combinées selon l'extension du cancer au moment du diagnostic, l'âge du patient et d'éventuelles autres maladies, sont proposées : la chirurgie (réalisable dans un cas sur cinq, le cancer étant souvent découvert trop tardivement), la chimiothérapie et la radiothérapie.

Mais en 2022, on peut en plus compter sur deux vagues majeures d'innovations récentes, les thérapies dites ciblées et l'immunothérapie. Deux avancées pourtant toujours mal connues du grand public, comme le prouve un sondage réalisé auprès d'un millier de personnes de plus de 18 ans en juillet dernier, où elles ne sont citées que par un Français sur cinq.

Les thérapies dites ciblées sont réservées aux tumeurs retirées chirurgicalement dont l'analyse génétique moléculaire — réalisée dans la trentaine de plateformes existant en France — permet de révéler la présence de mutations génétiques particulières (Egfr, Kras, Braf, ALK…). Autant de talons d'Achille de la tumeur sur lesquels il est parfois (dans 15 % des cas) possible d'agir spécifiquement avec ces traitements précisément dirigés contre cette mutation, plus efficaces que la chimiothérapie et moins générateurs d'effets secondaires.

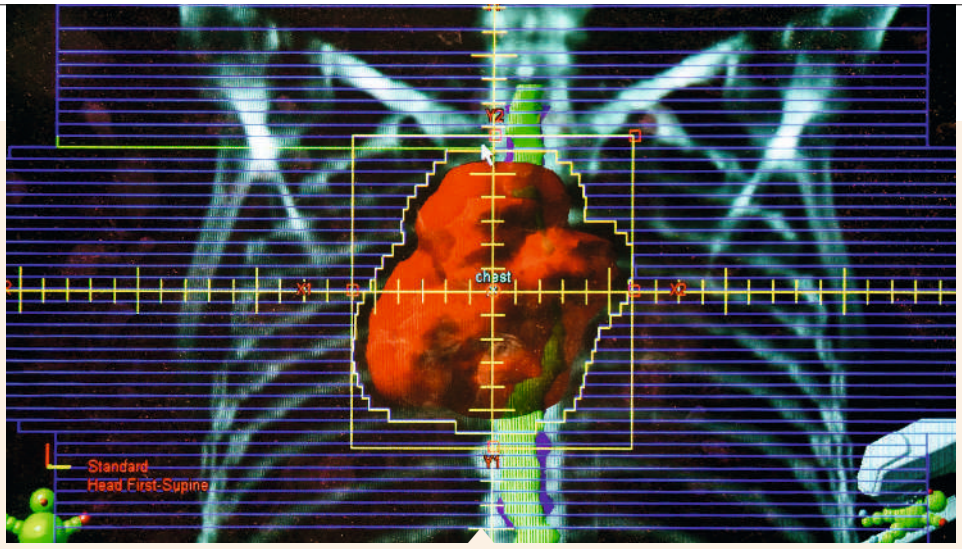
La seconde, c'est l'immunothérapie, une démarche qui consiste à stimuler le système immunitaire du patient pour que ses propres cellules, les lymphocytes, s'attaquent directement aux cellules tumorales. « *Mais avec le temps, des phénomènes de résistance apparaissent et nous ne disposons pas encore d'outils permettant de*

mons des nodules, des « taches » anormales quant à leur taille et leur aspect radiologique. Mais là où tout se complique, c'est que, dans ce groupe de fumeurs, la présence d'un ou plusieurs nodules est très fréquente, concernant environ 30 % des cas. « *Dans leur grande majorité (85 %), ils sont bénins, 10 % sont dits indéterminés et doivent être surveillés, et moins de 5 % sont cancéreux* », précise Sébastien Couraux. Et il n'est évidemment pas question de biopsier tous les nodules, le geste étant potentiellement à risque. La HAS précisait ainsi dans son dernier avis que « *si les bénéfices sont bien documentés, les dommages possibles liés au surdiagnostic et aux faux positifs sont à prendre en compte* », des sujets toujours à l'étude et pas encore précisément chiffrés. « *Il est essentiel de parfaitement structurer le dépistage pour que les patients soient entre les mains d'équipes expérimentées* », insiste Charles-Hugo Marquette. En attendant le programme pilote le mieux adapté à l'Hexagone, une douzaine de projets de recherche sont déjà sur pied. Pionnière dès 2016, l'étude DEP KP80, coordonnée dans la Somme par le Dr Olivier Leleu, du centre hospitalier d'Abbeville. Toujours en cours, elle a démontré sa faisabilité en incluant médecins généralistes, pneumologues et radiologues. Entièrement consacrée

CHARLES-HUGO MARQUETTE

« Il est essentiel de parfaitement structurer le dépistage pour que les patients soient entre les mains d'équipes expérimentées »

Charles-Hugo Marquette, pneumologue au CHU de Nice



ANTONIA REEVE/SPL/PHANIE

La radiothérapie est un traitement localisé qui utilise des rayonnements ionisants pour détruire les cellules cancéreuses en les empêchant de se multiplier.

prédire leur succès ou leur échec », précise Christos Chouaid. En attendant leur mise au point et d'autres progrès pour mieux couvrir les besoins restants, les oncologues n'ont de cesse de trouver les meilleures combinaisons parmi ces différentes approches, parfois même avant le recours à la chirurgie, si celle-ci est possible.

Exemple avec l'étude internationale ChekMate-816, dont les résultats de phase 3 conduits auprès de 358 patients ont été présentés en avril dernier par le Pr Nicolas Girard (de l'institut Curie, à Paris) au congrès de l'American Association for Cancer Research (AACR). Elle a démontré que l'ajout d'une immunothérapie à la chimiothérapie classique, dans le cancer non métastatique dit localisé, permettait de réduire de 40 % le risque de récidive dans le groupe traité. Si cette nouvelle association a obtenu le feu vert de la Food and Drug Administration, aux États-Unis, son accès en France reste pour l'instant en attente.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'institut national du cancer
▸ sciav.fr/910INC

Associations
De l'Air, première association de patients, bénévoles, aidants, soignants
▸ sciav.fr/910air

Mon réseau® cancer du poumon, premier réseau social et première application anonyme et gratuite :
▸ sciav.fr/910reseau

Association européenne (en anglais) :
▸ sciav.fr/910europe

aux femmes, l'étude Cascade *(lire l'encadré p. 68)*, a démarré cet été, et va aussi évaluer l'intérêt de l'intelligence artificielle (IA) pour la lecture des images. À Nice, le programme Da Capo, coordonné par Charles-Hugo Marquette, doit quant à lui débuter en 2023 auprès de 2400 personnes. Avec l'IA et la création d'une plateforme numérique permettant aux radiologues et pneumologues de partager et comparer les clichés de leurs patients à distance, il lancera une application mobile gratuite, Depiscann. En quelques questions, l'utilisateur saura s'il est candidat au dépistage et, s'il le souhaite, pourra être mis en lien avec un spécialiste. L'équipe niçoise cherche également, avec différents biomarqueurs sanguins en cours de validation (ADN des cellules tumorales circulantes, protéines, micro-ARN…), à déterminer l'existence d'une « signature sanguine » en lien avec le caractère malin d'un nodule.

Un scanner mobile sur les parkings de supermarchés

De son côté, à l'hôpital de Marseille, le Dr David Boulate va proposer le dépistage à des patients déjà suivis pour une pathologie cardio-vasculaire. Enfin, dans la région Auvergne-Rhône-Alpes va démarrer *« une expérience de scanner mobile, pour aller directement à la rencontre de ceux qui ne consultent pas spontanément mais en ont souvent le plus besoin, par exemple sur les parkings des supermarchés »*, complète Sébastien Couraux.

Alors, y aura-t-il assez de scanners ? Suffisamment de radiologues pour les interpréter ? Quel sera le taux dit de participation en vie réelle et non dans le cadre d'un protocole d'étude ? Aux États-Unis — l'un des trois seuls pays avec la Chine et la Corée du Sud à l'avoir mis sur pied —, il n'est que de 20 %. En attendant toutes ces réponses, les spécialistes sont unanimes pour encourager le dépistage individuel. Mais ils savent aussi que ce n'est pas le dépistage qui fera disparaître le cancer du poumon. Ici, rien ne vaut l'arrêt du tabac, bénéfique à tout âge. ■

Sylvie Riou-Milliot

Carton rouge pour les commotions cérébrales

La coupe du monde de football qui se tient au Qatar du 20 novembre au 18 décembre ne doit pas occulter le fait que les contacts physiques et les spectaculaires jeux de tête ne sont pas sans danger pour les joueurs. Une certitude scientifique dont la prise de conscience reste lente à venir.

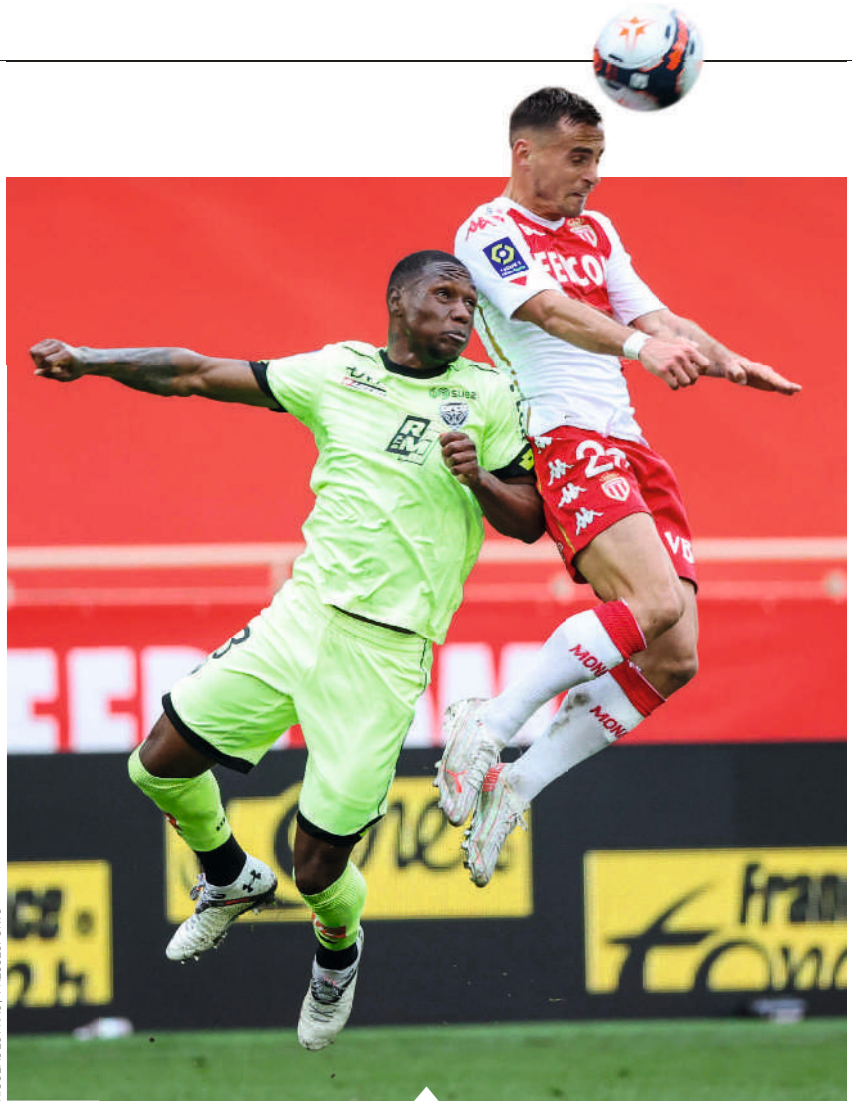
Têtes, tacles appuyés, chutes… Il ne faut pas l'oublier, le football est un sport qui peut être dangereux, notamment pour le cerveau. Mais, contrairement à d'autres sports de contact comme le rugby et le football américain, on n'a pas encore osé aborder le sujet de front. *« Au rugby, le K.-O. de Christophe Dominici en 2005 a été l'occasion d'un vrai coup de pied dans la fourmilière,* se remémore Jean-François Chermann, neurologue et spécialiste des commotions dans le sport. *Un protocole a depuis été mis en place : aujourd'hui un rugbyman professionnel commotionné reste sur le terrain dans 15 % des cas. Avant cela, plus de 50 % d'entre eux continuaient. »* Certes, dans la pratique du ballon rond les chocs sont moins violents et moins fréquents qu'au rugby, mais le nombre de licenciés en France est bien plus grand : 2 millions contre 300 000 pour le second. Le sujet devrait donc être sérieusement pris en compte par les autorités sportives et sanitaires, car les études montrant que le football est loin d'être à l'abri des commotions cérébrales s'accumulent.

La première grande alerte date de 2019. Une méta-étude américaine rapportait

PATHOLOGIE

Une neurodégénérescence spécifique aux sportifs

Dès 1920, il était évident que des coups répétés à la tête pouvaient provoquer des désordres mentaux et cognitifs comme des maux de tête, des vertiges, des nausées, des tremblements, mais aussi donner lieu à des accès de violence et à des changements de personnalité. Il s'agissait alors uniquement de boxeurs. Au début du XXIe siècle, l'anatomopathologiste américain Bennet Omalu y décèle une neurodégénérescence spécifique qui sera nommée encéphalopathie traumatique chronique (ETC). Et il va apporter la preuve que cette pathologie touche bien d'autres disciplines : essentiellement des sports de contact, mais aussi l'équitation par exemple, le sport le plus touché par les traumatismes crâniens. L'ETC est une accumulation progressive de protéines tau anormales qui tuent les cellules cérébrales. Elle se comporte comme la maladie d'Alzheimer, mais dans différentes parties du cerveau. L'IRM ne montre rien de particulier et est peu contributive. Actuellement, aucun traitement n'est disponible contre cette maladie qui n'existe toujours pas dans le registre des maladies dites ALD 30 de la Sécurité sociale.



NICOLAS LUTTIAU / PRESSESPORTS

C'est moins en réceptionnant la balle avec la tête qu'en percutant un autre joueur que les commotions surviennent, selon une étude américaine de 2020.

alors que si les joueurs professionnels de football anglais vivent plus longtemps que la population générale et sont globalement en meilleure santé, ils sont aussi trois fois plus à mourir de maladies neurodégénératives. Car derrière les commotions subies par les joueurs se cache une maladie terrible : l'encéphalopathie traumatique chronique ou ETC *(lire l'encadré)*, une affection neurodégénérative identifiée en 2002 par l'anatomopathologiste américain Bennet Omalu chez plusieurs joueurs décédés de la NFL (National Football League). Le problème est qu'il n'existe actuellement aucun moyen de diagnostiquer une ETC chez un sujet vivant. En 2020, une équipe américaine publiait, dans la revue médicale *Jama*, une piste d'étude des biomarqueurs consécutifs à une commotion, mais leur travail est encore trop préliminaire.

Que faire alors pour prévenir ou réduire les risques ? Des minerves high-tech, des casques spéciaux… ? *« Ça ne servirait à rien,* pronostique Jean-François Chermann. *Pour moi, les mesures les plus efficaces résident dans la prévention et la sortie de terrain dès qu'il y a suspicion.* » À la suite de la méta-étude de 2019, les fédérations britanniques ont décidé d'interdire les jeux de tête au football lors des entraînements des moins de 12 ans. C'est un premier pas, mais il est timide et sûrement voué à peu de progrès. En effet, une étude américaine de 2020 parue dans *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* montre que les jeunes joueurs ont peu de commotions. Et quand elles surviennent, c'est moins en « faisant une tête » qu'en percutant un autre joueur. Ce qui est logique : frapper le ballon de la tête est un mouvement contrôlé, intentionnel, où les muscles sont en alerte, au contraire d'une collision, soudaine et inattendue. Parmi les joueurs professionnels, seulement un tiers des commotions sont consécutives à une tête sur un ballon. *« La majorité des ETC ne sont pas dues aux grosses commotions, qui sont au fond des événements peu fréquents dans la vie du footballeur, mais à des sous-commotions répétées, consécutives à des impacts mineurs sans symptômes visibles »*, résume Jean-François Chermann.

Encore moins d'études sur les femmes, pourtant plus à risque

Autre sujet d'inquiétude, l'engouement autour du football a galvanisé ces dernières années beaucoup de jeunes femmes. La Fédération française de football (FFF) estime aujourd'hui avoir près de 200 000 licenciées. Malheureusement pour elles, les travaux les concernant sont encore plus rares alors qu'il semble qu'elles soient plus à risque de faire des commotions que leurs homologues masculins. En cause notamment, une nuque moins musclée. Pour pallier ce manque de connaissances, l'université de Boston (États-Unis) a lancé l'étude SHINE (acronyme anglais pour « étude des effets neurologiques des impacts de tête au football ») vouée à recruter 20 joueuses professionnelles et à les suivre durant leurs vies professionnelles en les soumettant à une batterie de tests sanguins et cognitifs et à des scanners cérébraux. D'ores et déjà, deux joueuses professionnelles de football ont été incluses dans cette étude : Brandi Chastain et Michelle Akers ont décidé de faire don de leurs cerveaux après leurs décès, afin de faire progresser ces (maigres) connaissances. ■ **Hervé Ratel**

Ces atouts qui plaident en faveur de l'avocat

Ce fruit oléagineux très nutritif est protecteur pour les artères et participe à la diversité de la flore intestinale. Mais attention à la région de production.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR – LA RECHERCHE

De l'or vert ! C'est ainsi que l'on surnomme l'avocat, tant sa consommation et les surfaces consacrées à sa culture (+ 4900 hectares en Colombie en 2019) ont considérablement augmenté ces dernières années. Ne serait-ce qu'en France, sa commercialisation a grimpé de 27 % en volume entre 2015 et 2020. Les Français en ont consommé 2,34 kg par personne en 2021 (1). On dénombre plus de 200 variétés d'avocats issues de trois races (mexicaine, antillaise et guatémaltèque). Les plus commercialisées sont l'avocat Hass, à la peau granuleuse et épaisse d'un poids moyen de 200 grammes, le Fuerte, en forme de poire et à la peau lisse, ou encore le Reed, d'origine californienne, rond et plus gros (jusqu'à 500 g). En guacamole (purée épicée), dans les *bowls* et *avocado toasts*, ce fruit frais oléagineux séduit toutes les générations avec sa chair onctueuse riche de nombreux atouts nutritionnels.

Un fruit bien pourvu en vitamines et en minéraux

Avec 430 mg/100 g, l'avocat fournit environ 15 % des apports journaliers recommandés en potassium, indispensable au bon fonctionnement neuro-musculaire et au maintien d'une pression artérielle normale. Il apporte également du magnésium (21 mg/100 g) et du cuivre à hauteur de 10 % des besoins journaliers. L'avocat est une source de vitamine K (14,5 microgrammes/100 g), qui participe au mécanisme de la coagulation sanguine, facilite la bonne fixation du calcium et améliore la résistance à l'insuline, et de vitamine B9 (70,4 microgrammes/100 g) et B5 (1 mg/100 g), laquelle favorise le métabolisme de la vitamine D.

1,2
million de tonnes
d'avocats ont été exportées par le Mexique en 2021-2022, 555 700 tonnes par le Pérou et 126 700 tonnes par le Chili. L'Espagne a exporté 68 000 tonnes d'avocats en 2021-2022. En France, la Corse en a produit 10 tonnes.

OLÉAGINEUX Plantes cultivées pour leurs graines (tournesol, lin, etc.) ou leurs fruits (noix, noisettes, pistaches, amandes, etc.), riches en matières grasses, dont on peut extraire l'huile.

VITAMINE K Vitamine liposoluble présente sous deux formes : la vitamine K1 (phytoménadione, phylloquinone ou phytonadione) apportée par l'alimentation et la vitamine K2 (ménaquinones) produite en petite quantité par les bactéries intestinales.

ACIDE OLÉIQUE Acide gras mono-insaturé (AGMI) dont le nom vient du latin « oleum » qui signifie huile. Il est naturellement présent dans les huiles d'olive, de noisette et de colza.

L'avocat et son huile sont également bien pourvus en vitamine E (respectivement 2,2 mg/100 g et 45,3 mg/100 g) (2).

C'est une bonne source d'antioxydants

L'avocat et son huile issue de la pulpe apportent des caroténoïdes dont la lutéine, qui présente un intérêt dans la prévention de maladies telles que la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) et la cataracte. Aussi, ajouter 24 g d'huile d'avocat ou 150 g d'avocat à une salade contenant des carottes, de la laitue et des épinards permettrait d'augmenter entre 5 et 15 fois l'absorption des caroténoïdes (α-carotène, β-carotène, lutéine) présents dans ces aliments (3). L'huile d'avocat doit être choisie vierge, de première pression à froid, idéalement bio. Elle peut être consommée crue et être utilisée pour la cuisson car elle reste stable à haute température (250 °C).

Ses graisses sont bénéfiques pour le cœur

L'avocat est calorique (205 kcal/100 g de chair) en raison de sa richesse en lipides (environ 21 g/100 g de pulpe). Il s'agit pour près de 80 % d'acides gras insaturés dont des acides gras mono-insaturés (12,3 g/100 g) sous la forme d'acide oléique (8,72 g/100 g). Cet oméga-9 favorise le maintien d'un taux optimal de HDL cholestérol (ou « bon » cholestérol) dans le sang, protecteur des artères. Consommer au moins deux portions d'un demi-avocat par semaine réduirait de 16 % le risque de maladie cardio-vasculaire et de 21 % celui de maladie coronarienne, selon une étude américaine menée auprès de 110 480 hommes et femmes, suivis pendant trente ans (4).

Il procure une sensation de satiété

Grâce à ses acides gras et ses fibres (3,6 g/100 g de pulpe) régulatrices du transit intestinal, l'avocat contribue à une meilleure satiété et à moins de grignotage durant la journée. Les fibres diminuent également l'absorption des graisses et aident à limiter la prise de poids. Mais attention à ne pas abuser du guacamole industriel. Certaines marques comme Old El Paso ajoutent, en plus des additifs habituels (colorants, correcteurs d'acidité, etc.) de l'huile — alors que l'avocat est déjà naturellement riche en graisses —, mais aussi du sucre (dextrose, sirop de glucose) et de l'eau. Veillez à ce que le produit contienne au moins 90 % d'avocat. En outre, cette purée souvent passée au mixeur s'avère moins riche en fibres, cassées par le mixage.

Un avocat quotidien serait bon pour l'intestin

C'est ce qu'ont constaté des chercheurs américains chez 163 personnes en surpoids ou souffrant d'obésité. Celles qui consommaient un avocat par jour présentaient une plus grande abondance et diversité de microbes intestinaux par rapport au groupe témoin qui ne mangeait pas d'avocat. Par exemple, le microbiote du groupe « avocat » comportait davantage de bactéries *Faecalibacterium*, *Lachnospira* et *Alistipes* (de 26 % à 65 %), lesquelles sont capables de fermenter les fibres alimentaires et de produire des acides gras à chaîne courte tel l'acétate (+18 %), favorables à la santé intestinale (5). ■

Sylvie Boistard @syboistard

ÉRIC IMBERT Chercheur au Cirad* de Montpellier

Des besoins de culture inégaux

« La production d'avocat est controversée en raison des usages de l'eau dans certaines régions de production. Les zones de culture sèches comme la Corse ou l'Espagne en demandent un peu plus mais elles ne nécessitent quasiment pas de traitements, *a contrario* des zones humides (Colombie par exemple), plus sujettes aux maladies. La culture fait en revanche vivre bon nombre de petits et moyens producteurs dans des zones rurales isolées. Sur cet aspect, notre mission est d'aider les producteurs du Sud (Espagne, notamment) à ce que cette filière reste économiquement viable pour eux. »

* Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

(1) Cirad.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Carotenoid absorption from salad and salsa by humans is enhanced by the addition of avocado or avocado oil, Unlu N. Z. et al., *Journal of Nutrition*, 2005.

(4) Avocado Consumption and Risk of Cardiovascular Disease in US Adults, Pacheco L. S. et al, *Journal of the American Heart Association*, 2022.

(5) Avocado Consumption Alters Gastrointestinal Bacteria Abundance and Microbial Metabolite Concentrations among Adults with Overweight or Obesity: A Randomized Controlled Trial, Thomson S. V. et al, *The Journal of Nutrition*, 2021.

JUANCHO TORRES/GETTY IMAGES

Un mausolée a été construit à San Bernardo (Colombie) où ont été placées dans des cercueils de verre des momies exhumées du cimetière du village afin que se poursuive le processus naturel de leur décomposition avant leur transfert dans l'ossuaire.

Momies

L'énigme du cimetière de San Bernardo

Dans un village de Colombie, les corps des défunts se momifient spontanément. Ce phénomène étonnant qui touche un cadavre sur cinq laisse perplexes les chercheurs. L'inhumation dans des caveaux en hauteur, loin de l'humidité du sol, pourrait accélérer la déshydratation des tissus et donc leur conservation. Reportage.

Par Nicolas Gutierrez C., envoyé spécial @n6g6c

Une nature luxuriante défile à travers la fenêtre le long des routes des montagnes du centre de la Colombie. Au bout de quatre heures de trajet depuis la capitale, Bogotá, surgit le village de San Bernardo, à 1600 mètres d'altitude. Un village connu pour la fertilité de ses sols et la grande variété de fruits qui y sont cultivés. Mais aussi pour une autre particularité quasi inconnue : des corps qui se momifient — aujourd'hui encore — en l'absence de toute intervention humaine. Des momies qui évoquent le réalisme magique de Gabriel García Márquez, mais qui n'ont rien à voir avec l'imagination du Nobel de littérature colombien : celles-ci sont bien réelles. Spécialiste du culte de la mort à l'université Icesi (Cali, Colombie), Monica Castaño confesse qu'aucune étude scientifique n'a encore réussi à expliquer ce mystère. Surplombant le village, apparaît le cimetière sur une colline. Au fond, parmi les arbres et les caveaux fleuris, se trouve le mausolée où reposent les fameuses momies.

BRUNO BOURGEOIS

Pourquoi un mausolée ? C'est que dans le cimetière, le nombre de caveaux est limité. La coutume veut que l'on déterre les corps environ sept ans après le

décès pour transférer les restes dans des ossuaires. Mais à San Bernardo, environ 20 % des corps exhumés apparaissent momifiés. « *Les momies ont commencé à apparaître dans les années 1960, une dizaine d'années après la construction de ce cimetière,* raconte la directrice du mausolée, Rocio Vergara Rodriguez. *Aussi, les familles des défunts ont demandé que les corps soient conservés au lieu de les démembrer pour les transférer dans les ossuaires. Au début, les momies étaient gardées dans le sous-sol de la chapelle. Le mausolée a été créé pour mieux les protéger durant leur processus de décomposition.* » Car rien n'est fait pour forcer leur conservation, les momies sont simplement couchées sous un verre protecteur où elles poursuivent leur processus naturel de décomposition. Plus de 400 momies ont été retrouvées depuis, dont plus de 40 enfants… et il n'y a toujours pas d'explication.

« *L'hypothèse la plus répandue chez les habitants du village est que les corps se conservent ainsi grâce à une alimentation très saine, reposant notamment sur deux fruits connus pour leurs bienfaits : le balu et la guatila* », poursuit Rocio Vergara Rodriguez. Se pourrait-il que ces personnes s'alimentent si bien que même mortes, elles resteraient en bon état ? « *Cette hypothèse ne tient pas,* répond-elle. *Ces fruits sont consommés dans d'autres endroits en Colombie où l'on ne voit pas des momies comme ici.* »

D'autres expliquent que la terre de cette région pourrait contenir des éléments favorisant la conservation des corps. Sauf qu'à San Bernardo, les cercueils ne sont pas enterrés, mais placés dans des caveaux en dehors du sol, donc la composition de la terre ne peut avoir grande influence sur les cadavres.

Une hypothèse plus plausible est celle d'une déshydratation des corps, due à une augmentation de la température à l'intérieur de ces caveaux hors sol, qui reçoivent les rayons de soleil de plein fouet pendant une bonne partie de l'année. « *Il y a un micro-environnement qui*

PHILIPPE CHARLIER MÉDECIN LÉGISTE, ANTHROPOLOGUE ET ARCHÉOLOGUE *

« L'environnement, les vêtements et même les antibiotiques favorisent la momification naturelle »

JACK TRIBECA / BESTIMAGE

“Il y a plusieurs conditions environnementales qui favorisent la momification naturelle. Le premier exemple est le désert. Très sec, cet environnement va absorber l'humidité du corps. Et il n'y a pas de décomposition ou de putréfaction sans eau : les bactéries se déshydratent et la peau devient dure et inattaquable par les insectes. Il y a aussi l'embaument dans la glace. C'est alors comme si l'on mettait le corps dans un congélateur : la décomposition est mise en suspens. Viennent enfin les environnements hyper-humides, comme les tourbières qu'on retrouve dans le nord de l'Europe. Ce sont des environnements acides et anaérobiques : le manque d'oxygène et l'acidité ne permettent pas la pullulation de bactéries ni d'insectes, ce qui protège le corps. Dans des endroits moins extrêmes, il est possible de favoriser le processus de conservation. Par exemple, dans la crypte d'une église, si elle est bien ventilée. Les mouches sont chassées et le corps va se dessécher progressivement à cause de ce courant d'air. Notamment si le vent est chargé en sel, comme en Sicile. Il y a aussi le cas de personnes qui sont retrouvées momifiées dans leur logement. Cela peut arriver quand les vêtements du défunt, tels qu'une robe de chambre, absorbent les liquides corporels lorsqu'ils coulent par les orifices naturels et protègent le corps des mouches. Si ce n'est un vêtement, un matelas ou un tapis peuvent absorber cette humidité. Une alimentation chargée en conservateurs ou en antibiotiques favorise aussi cette préservation du corps, ainsi que le port de vêtements synthétiques lors du décès, car ils ne se décomposeront pas et protégeront longtemps le corps.”

Propos recueillis par N. G. C.

* Directeur du département de la recherche et de l'enseignement au musée du Quai Branly-Jacques-Chirac, à Paris

NICOLAS GUTTIEREZ C.

Le village de San Bernardo, à 1600 m d'altitude, est situé dans les Andes, à quelque 100 km au sud-ouest de Bogotá.

NICOLAS GUTTIEREZ C.

Les caveaux cimentés protégeraient les corps des défunts des insectes et permettraient leur assèchement en n'étant pas totalement hermétiques.

JUANCHO TORRES/GETTY IMAGES

Les traits du visage et même les sourcils apparaissent ici dans un remarquable état de conservation.

se crée à l'intérieur des caveaux et encore un autre à l'intérieur des cercueils, favorisant l'évaporation de l'humidité des corps », explique César Sanabria, anthropologue médico-légal de l'université Antonio Nariño et de l'Institut national de médecine légale, à Bogotá, qui s'est intéressé au mystère des momies de San Bernardo.

Un environnement propice au dessèchement des corps

« *Il est très probable que la température augmente suffisamment dans ces caveaux pour accélérer la déshydratation des corps,* confirme Albert Zink, directeur de l'Institut d'étude de momies au Centre de recherche Eurac à Bolzano (Italie). *Il faut aussi que cette humidité puisse partir après s'être évaporée, sinon, bien au contraire, le corps se décomposerait très rapidement. Le cercueil et les vêtements peuvent en absorber une partie, mais la majorité doit pouvoir sortir du caveau. Le ciment de ces tombeaux n'est probablement pas entièrement hermétique, il doit permettre un minimum d'échanges gazeux pour laisser échapper l'humidité du cadavre.* » Hypothèse : les bâtiments à cercueils protégeraient les corps des insectes et autres nuisibles tout en facilitant l'assèchement des corps.

Mais pourquoi est-il important que ces corps se dessèchent pour se momifier ? Sans eau, il n'y a pas de décomposition, explique Albert Zink. « *Quand on décède, les cellules du corps commencent très rapidement à se dégrader, d'abord par les bactéries de notre microbiote, qui décomposent nos tissus. Mais ces processus nécessitent un minimum d'humidité : au-dessous de 30 %, ces bactéries ne peuvent pas se développer. Les réactions chimiques qui dégradent notre ADN et autres macromolécules sont aussi mises en pause s'il n'y a pas assez d'eau dans les cellules* », détaille l'anthropologue.

L'argumentation est convaincante, mais comment expliquer que seule une partie des personnes décédées à San Bernardo connaissent ce processus de momifica-

tion ? Plusieurs autres facteurs pourraient entrer en jeu. *« Cela dépend de chaque personne, par exemple de leur corpulence : quelqu'un de maigre aura une plus grande probabilité de momification, car son corps se déshydraterait plus rapidement »*, estime Albert Zink. La cause du décès aurait aussi son importance. Certaines maladies, tel le cancer, déshydratent le corps du malade, favorisant le processus de momification, alors que des maladies infectieuses accéléreraient la décomposition du cadavre. La période de l'année durant laquelle survient le décès pourrait aussi être importante : l'humidité ambiante est plus élevée pendant la saison des pluies, alors qu'un enterrement pendant la période sèche serait plus propice. *« C'est sûrement un mélange de tous ces facteurs,* poursuit Albert Zink. *Même les vêtements avec lesquels le défunt est enterré pourraient jouer un rôle, en absorbant plus ou moins l'humidité du corps en fonction de leurs matériaux. »*

D'autres cas de momification découverts à Bogotá

Des études scientifiques seraient nécessaires pour confirmer l'hypothèse de déshydratation comme mécanisme de momification à San Bernardo. Or, plus aucune investigation n'est permise par le village. *« Quand nous avons autorisé ces recherches, des corps ont été abîmés ou même volés, sans pour autant produire de résultats,* justifie Rocio Vergara Rodriguez. *Les chercheurs peuvent étudier le sol ou l'intérieur des caveaux vides, mais pas les corps, car nous avons une responsabilité envers les familles de ces défunts. »*

Les momies de San Bernardo sont-elles un cas unique ? Mal documenté, le phénomène pourrait en réalité ne pas être rare dans ce genre de caveaux. *« Ce type de momification arrive dans la majorité des villes de Colombie, je n'ai aucun doute là-dessus,* affirme César Sanabria. *À Bogotá, par exemple, l'Institut national de médecine légale en a découvert quelques-unes. »* Selon le légiste, ces momies dans les autres villes sont beaucoup moins connues car la plupart des corps y sont brûlés lorsqu'on ne peut pas les transférer dans un ossuaire. *« Avant, on ne les voyait pas forcément, mais depuis quelques années nous avons constitué une collection de restes humains de référence ; nous avons ainsi récupéré autour de 600 cadavres qui n'ont pas été réclamés par leur famille en vue de les transférer dans des ossuaires. Une minorité d'entre eux étaient momifiés, avec certes une fréquence plus basse qu'à San Bernardo, où l'environnement est sans doute plus propice à ce processus. »* Difficile d'en savoir plus car, en Colombie, les ressources pour les études médico-légales sont avant tout consacrées à l'identification des milliers de victimes du conflit armé.

NOIGOLASGUTIERREZ C.

Les défunts momifiés, exposés dans le mausolée, continuent d'être visités et honorés par leurs proches (ici, une fleur et un tissu de dentelle en témoignent).

Les cas de momification naturelle ne sont cependant pas l'apanage de la Colombie. *« Notre institut a réalisé des études sur les momies naturelles en Italie, au Pérou ou encore au Chili,* précise Albert Zink. *Mais peu de ces recherches étudient spécifiquement le processus de momification. Il y a un grand intérêt pour les études sur les momies, mais il y a un manque de financement et peu d'équipes de recherche focalisées sur ces études. »*

Le mystère reste donc entier. La plus récente des momies de San Bernardo a été retrouvée en juin dernier. Elle se nommait Maria Iria Rodriguez… et elle était la tante de Rocio Vergara Rodriguez, qui l'« héberge » désormais dans son mausolée. Comme sa tante, elle confie qu'elle aussi souhaiterait y habiter après sa mort : *« J'aimerais que mes proches puissent venir me rendre visite, que ma fille puisse venir me voir. Mais c'est ma famille qui devra prendre cette décision, ce sont eux qui seront encore là. »* Un message qui montre qu'à San Bernardo, il fait bon vivre… même après la mort. ■

Des études scientifiques seraient nécessaires pour confirmer l'hypothèse de déshydratation comme mécanisme de momification

*À force d'entendre qu'on ne vaut rien, on finit par le croire.

APPRENTIS D'AUTEUIL

À Apprentis d'Auteuil, nous voyons le meilleur en chacun des 30 000 jeunes[1] que nous accompagnons jour après jour dans nos 300 établissements et dispositifs. Aidez-les à construire leur avenir.

LA CONFIANCE PEUT SAUVER L'AVENIR

FAITES UN DON sur www.apprentis-auteuil.org

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2021.
Agence Marcel - © Aurélien Chauvaud.

Sapiens–Neandertal, pour quelques neurones de plus

Une étude montre que les humains modernes portent une mutation génétique qui leur aurait permis de générer plus de neurones que les néandertaliens. Cette différence a-t-elle donné un avantage cognitif décisif aux « H. sapiens » par rapport à leurs cousins disparus ? Le débat s'engage.

Notre cousin Neandertal, disparu il y a 30 000 ans, avait un cerveau aussi gros que le nôtre, mais était-il différent sur le plan de la cognition ? Cette question, qui sous-tend celle de son extinction, obsède les scientifiques, notamment depuis le séquençage de son génome au cours des années 2000. Aujourd'hui, des expériences fascinantes conduites à l'Institut Max-Planck de biologie cellulaire moléculaire et génétique (MPI-CBG), à Dresde (Allemagne), montrent que les humains modernes portent une mutation génétique qui leur aurait permis de générer plus de neurones que les néandertaliens. Celle-ci serait survenue au cours des dernières centaines de milliers d'années dans le cortex préfrontal, la partie du cerveau que nous utilisons pour les formes de pensée les plus complexes.

La démonstration a été faite sur des souris, des furets, des cerveaux fœtaux humains et des mini-cerveaux organoïdes, que les scientifiques ont tour à tour humanisés ou néandertalisés pour observer la pousse différenciée de cellules neuronales. *« C'est vraiment un tour de force,* admire Laurent Nguyen, neuroscientifique à l'université de Liège en Belgique, qui n'a pas participé à l'étude. *Il est remarquable qu'un si petit changement ait un effet aussi spectaculaire sur la production de neurones.* »

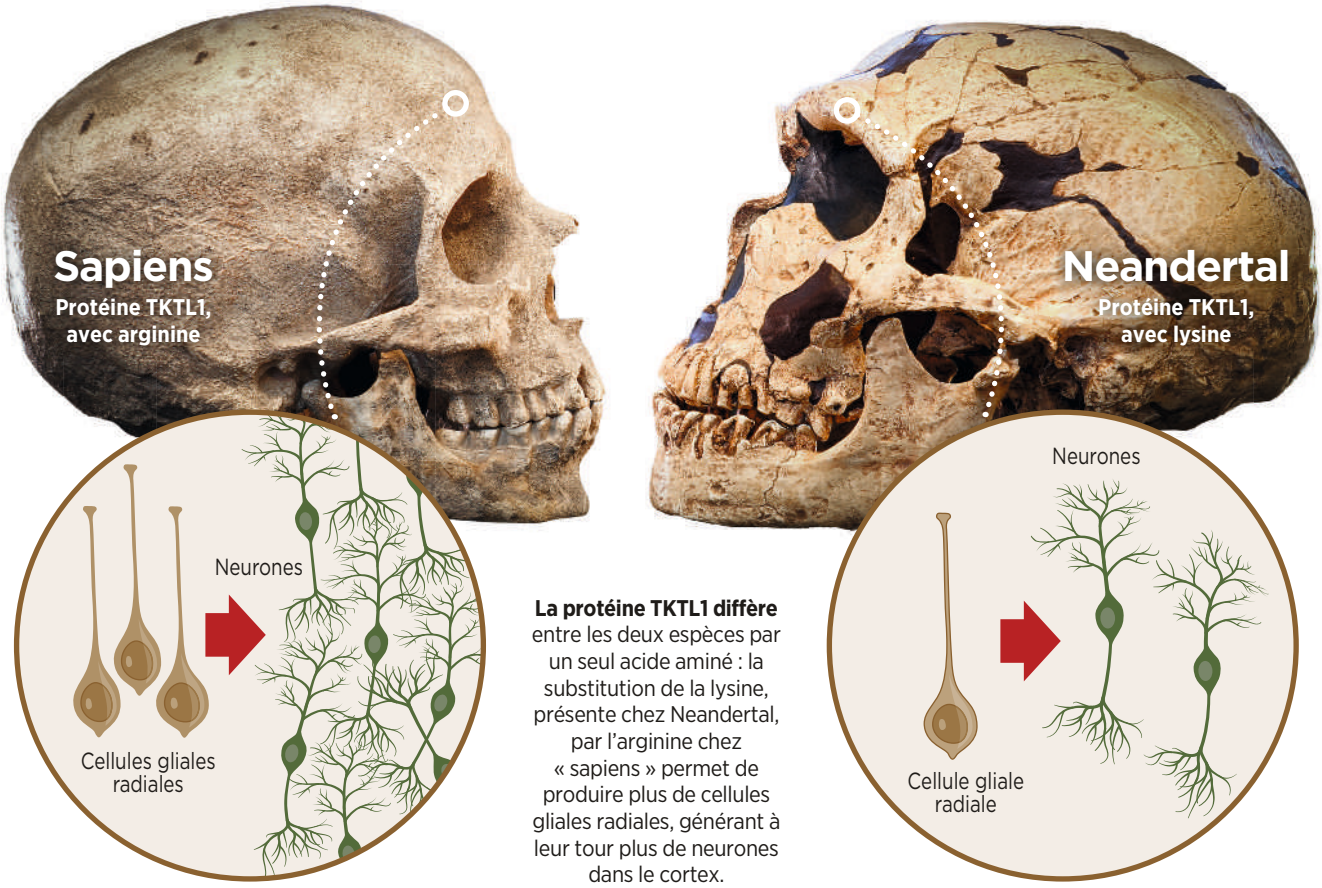
Peut-on pour autant en conclure que cette différence a donné un avantage cognitif décisif aux *H. sapiens* par rapport à leurs cousins mystérieusement disparus ? Pas si vite…

Cela fait quelques années que l'équipe du MPI-CBG emmenée par le neurobiologiste Wieland Huttner se focalise sur les dissemblances génétiques potentiellement cruciales entre les néandertaliens et les humains modernes dans les cellules cérébrales. L'ADN humain contient environ 21 000 gènes codants. Les protéines issues de ces gènes sont pour la majorité identiques à celles des néandertaliens, mais 96 mutations spécifiques à l'*Homo sapiens* ont été identifiées en 2014 par le généticien Svante Pääbo, prix

L. NGUYEN

« Il est remarquable qu'un si petit changement ait un effet aussi spectaculaire »

Laurent Nguyen, neuroscientifique à l'université de Liège, en Belgique



La protéine TKTL1 diffère entre les deux espèces par un seul acide aminé : la substitution de la lysine, présente chez Neandertal, par l'arginine chez « sapiens » permet de produire plus de cellules gliales radiales, générant à leur tour plus de neurones dans le cortex.

PHILIPPE PSAILA/SPL/SUCRE SALÉ - BRUNO BOURGEOIS

Nobel de médecine 2022 *(lire* S. et A. *n° 909, novembre 2022).*

Dès 2017, Anneline Pinson, postdoctorante au MPI-CBG, repère que l'une de ces mutations concerne le gène TKTL1, actif dans le cortex humain en développement et particulièrement abondant dans la partie frontale du néocortex cérébral, la fameuse « matière grise ». Une observation excitante, parce que le lobe frontal, partie la plus grosse et la plus récemment évoluée de notre cerveau, est aussi responsable des capacités cognitives. La protéine transketolase-like 1 (TKTL1) présente un seul changement parmi les acides aminés qui la constituent, entre les humains modernes et les néandertaliens. Les expériences peuvent démarrer. *« Les chercheurs ont introduit les versions humaine et néandertalienne du gène chez des souris, qui n'expriment généralement aucune des deux formes de la protéine au cours de leur développement cérébral »*, détaille le neuroscientifique Laurent Nguyen. Résultat ?

Le cerveau d'« H. sapiens » comporte davantage de plis

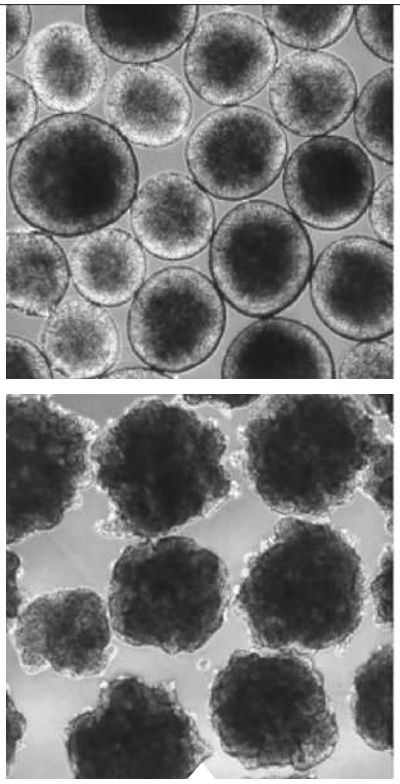
Les cerveaux de souris avec la version moderne du gène ont produit plus de neurones corticaux que les cerveaux de souris auxquels on avait injecté la version archaïque. Autre observation troublante : TKTL1 semble influencer le repliement du cerveau. *« Les souris n'ont aucun de ces plis, mais les furets, bien qu'ils portent la version archaïque de TKTL1, en ont quelques-uns »*, précise Laurent Nguyen. Lorsque les chercheurs ont introduit la version *H. sapiens* du gène chez des furets, ceux-ci ont produit plus de neurones corticaux et avaient des plis cérébraux plus grands. Avantage de ces plis : les signaux neuronaux voyagent plus rapidement et permettent au cerveau de fonctionner plus vite.

L'équipe de l'Institut Max-Planck a poursuivi ses travaux sur des cellules humaines en utilisant des fragments de tissu cérébral fœtal (obtenus grâce au consentement de femmes ayant avorté). Des ciseaux moléculaires CRISPR-Cas 9 ont permis d'extraire le gène TKTL1 des cellules de tissu cérébral humain. Dès lors, celles-ci ont commencé à produire moins de ces cellules progénitrices qui donnent naissance aux neurones. Pour leur dernière expérience, les scientifiques ont créé un cerveau miniature néandertalisé. Ils ont modifié le gène TKTL1 d'une cellule souche embryonnaire humaine pour qu'elle porte la

version néandertalienne et l'ont laissée pousser jusqu'à ce qu'elle forme un amas de tissu cérébral en développement. Cet « organoïde cérébral » a produit moins de cellules progénitrices et donc moins de neurones que les organoïdes qui avaient conservé la version *H. sapiens* du gène. Cela suggère que lorsque le gène TKTL1 a muté — *« il y a peut-être 250 000 ans »* selon Wieland Huttner —, nos ancêtres ont pu produire des neurones supplémentaires dans le lobe frontal.

La question de la supériorité cognitive reste hypothétique

« Cette étude implique que la production de neurones dans le néocortex au cours du développement fœtal est plus importante chez l'humain moderne qu'elle ne l'était chez Neandertal, en particulier dans le lobe frontal, résume Wieland Huttner. *Il est tentant de supposer que cela a favorisé les capacités cognitives humaines modernes associées au lobe frontal.* » Tentant de faire ce raccourci : une simple mutation génétique nous a rendus plus intelligents. *« Des milliers de différences d'ADN sont impliquées dans les différences cérébrales entre les* sapiens *et les néandertaliens »*, tempèrent immédiatement les anthropologues Marcia Ponce de León et Christoph Zollikofer, de l'université de Zurich (Suisse).



ALYSSON MUOTRI

Les neurones d'humain moderne (en haut), aux contours plus arrondis, ont davantage de connexions synaptiques que les neurones « néandertalisés » (en bas).

Quant à penser qu'un plus grand nombre de neurones du lobe frontal implique une intelligence supérieure, *« cela semble intuitif, mais il y a un long chemin à parcourir entre le fait d'avoir plus de neurones dans le lobe frontal et celui de connecter ces neurones de manière appropriée pour qu'ils se traduisent par une meilleure cognition »*, poursuivent les deux scientifiques. Laurent Nguyen confirme : *« Ces résultats sont loin d'être une preuve définitive de l'intellect supérieur des humains modernes, mais démontrent que les néandertaliens avaient des différences significatives dans le développement du cerveau. »*

Le gène étudié est-il le seul pertinent ?

Généticien à l'université de Californie à San Diego (États-Unis), Alysson Muotri formule une objection d'un autre ordre. *« Je suis sceptique quant à la pertinence réelle de ce gène pour explorer ce que notre cerveau a d'unique. TKTL1 ne figurait pas dans notre liste de 61 gènes différents entre les humains modernes et les néandertaliens, établie en 2021. Les auteurs ont utilisé l'ancienne liste de gènes proposée par Svante Pääbo en 2014, comparant les néandertaliens aux* Homo sapiens *européens uniquement. Nous avons utilisé toutes les populations humaines dans nos analyses, augmentant ainsi la diversité.* » La nuance est d'importance : *« Il y a en fait plusieurs humains modernes qui marchent avec la putative "variante néandertalienne" de TKTL1 aujourd'hui ! »*

Pas de quoi disqualifier l'intérêt de cette mutation, rétorque Wieland Huttner. *« Plus précisément, la version "archaïque" du gène a été trouvée chez 11 humains en tout parmi 76 000 génomes. La fréquence de l'allèle néandertalienne est estimée à 0,2 % dans les populations. C'est infime. Dotés de moins de neurones, les porteurs de la version néandertalienne du gène ont pu développer des mécanismes de compensation. »* Si TKTL1 n'est pas le « gène clé » qui a rendu notre cerveau moderne, son analyse *« va certainement susciter de nombreuses autres études sur le développement du cerveau archaïque par rapport au cerveau moderne »*, conclut Christoph Zollikofer. ■ **Rachel Mulot**

@RachelFleaux

DÉVELOPPEMENT

Des divergences cérébrales au stade embryonnaire

Les nouveaux résultats de l'Institut Max-Planck de Dresde (Allemagne) permettent de confirmer la loi dite de von Baer. C'est en 1828 que le Russe Karl von Baer, considéré comme le père de l'embryologie, propose que les disparités entre espèces sont en grande partie dues à des différences de développement embryonnaire. Plus une différence apparaît tôt au cours du développement, plus son impact est important sur le phénotype adulte. À l'université de Zurich (Suisse), Marcia Ponce de León et Christoph Zollikofer étudient depuis 2011 le développement de la boîte crânienne chez les néandertaliens et les *H. sapiens,* de la naissance à l'âge adulte. *« Nous en avons déduit que le développement du cerveau diffère entre les deux espèces avant la naissance, mais est similaire après. »* Cette nouvelle étude génétique confirme donc l'hypothèse de divergences prénatales dans le développement du cerveau entre les néandertaliens et les humains modernes.

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

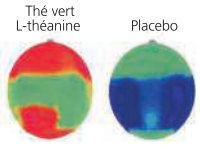
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 89 16 13 15** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

CADEAUX HIGH TECH SPÉCIAL NOËL

Ils nous accompagnent partout !

Bien chez soi, bien au dehors. La technologie s'adapte à nos modes de vie de plus en plus disruptifs entre travail à distance, mobilité et quête de confort. À la maison, objectif repos et ressourcement : on prend soin de son environnement et on cultive tout naturellement son petit jardin d'intérieur. Et une fois dehors, on s'équipe d'appareils ultraperformants qui jouent la carte de l'endurance et de l'efficacité tout-terrain. Avec, quand c'est possible, une préférence pour le mode énergie douce. À l'approche des fêtes de Noël, voici une sélection de cadeaux malins pour adoucir le quotidien « in » comme « out ».

DOSSIER COORDONNÉ PAR Caroline Brun, Agence Forum News
RÉDACTION : William Coop-Phane

Home cinéma

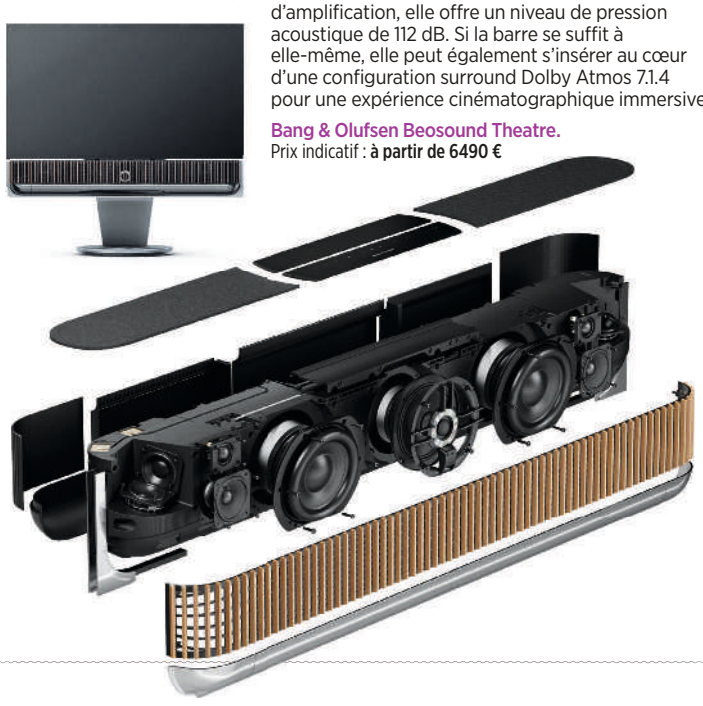
▶ Malin et simple à utiliser, ce vidéoprojecteur nomade (830 g) diffuse un son à 360° et s'installe en un clin d'œil. La mise au point tout comme l'ajustement du trapèze s'opèrent automatiquement, tandis que la taille de l'image (full HD) s'adapte selon les envies : de 30 pouces à 100 pouces. L'appareil pivote à 180°, une invitation à regarder ses séries même au plafond.

Samsung The Freestyle.
Prix indicatif : **999 €**

Son immersif

▶ Prouesse acoustique pour cette barre de son qui propose la puissance d'un home cinéma multicanaux en un objet unique. Équipée de 12 haut-parleurs, dont deux *woofers* de 6,5 pouces à longue course et 800 watts de puissance d'amplification, elle offre un niveau de pression acoustique de 112 dB. Si la barre se suffit à elle-même, elle peut également s'insérer au cœur d'une configuration surround Dolby Atmos 7.1.4 pour une expérience cinématographique immersive.

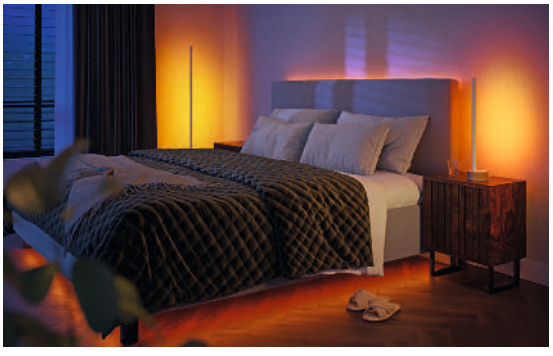
Bang & Olufsen Beosound Theatre.
Prix indicatif : **à partir de 6490 €**



Écrin de verdure

▶ Aromates, herbes, micro-pousses et autres salades fraîches sont toujours à portée de main grâce à ce potager d'intérieur qui favorise la photosynthèse naturelle des plantes. Son système d'éclairage adapte le spectre lumineux en fonction de la phase de pousse des graines (rose pour la germination, blanc bleuté pour la période de croissance) pendant que son système d'irrigation dose la quantité idéale d'eau et de nutriments, à tout instant. Sans déperdition de ressources. En trois semaines, première récolte !

Bosch SmartGrow Life. Prix indicatif : **179,99 €**



Fête des lumières

▶ Tout en élégance et discrétion, cette lampe Bluetooth éclaire vos murs d'un subtil dégradé de couleurs, des tons qui reproduisent, par exemple, la lueur d'une bougie ou celle d'un feu de cheminée pour une ambiance cocooning. Le matin, le luminaire, qui peut être commandé à la voix, se transforme en simulateur d'aube, une façon de se réveiller en douceur avec le soleil, mais à l'heure de son choix.

Philips Hue Signe. Prix indicatif : **à partir de 239,99 €**

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

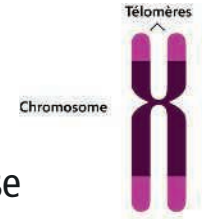
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

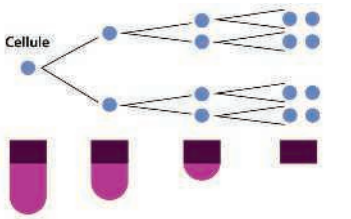
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

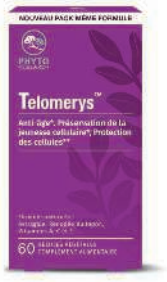
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 50 33 40** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ : Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Énergie solaire

▶ Une endurance hors norme pour cette tocante multisport : son verre solaire permet de prolonger son autonomie jusqu'à 46 jours en mode montre connectée et jusqu'à 150 heures en mode GPS, un must pour les courses d'ultra-endurance. Parmi ses autres atouts, la lampe de poche LED et la cartographie intégrée (cartes de ski et cartes TopoActive), le paiement sans contact et le suivi du bien-être (variabilité de la fréquence cardiaque, taux d'oxygène dans le sang, niveaux de stress…). À la clé, des conseils pour mieux récupérer et optimiser ses performances.

Garmin Enduro 2. Prix indicatif : **1099,99 €**

Tablette poids plume

▶ Son dos texturé confère à cette tablette 11 pouces une bonne prise en main et une ergonomie appréciable. Dotée d'un quadruple haut-parleur stéréo Dolby Atmos, elle est à l'aise dans les principaux usages multimédia et recèle une floppée d'astuces, comme la possibilité de scinder son écran et d'utiliser deux applications en simultané. L'écran, certifié TÜV Rheinland Eye Care, réduit l'émission de lumière bleue, une bonne idée pour les utilisations prolongées.

Oppo Pad Air. Prix indicatif : **à partir de 299,90 € (version 4 Go de RAM + 64 Go de stockage)**

Ordi à armature renforcée

▶ Avec son châssis en magnésium et carbone, cet ultraportable de 13 pouces affronte les défis du quotidien avec brio : il résiste à la poussière, aux températures extrêmes, mais aussi aux chutes d'une hauteur de 76 cm. Cette robustesse, ainsi que sa légèreté (870 g) et son écran mat (tactile), en font un parfait compagnon de vadrouille. Estampillé Evo, il bénéficie de la nouvelle certification Intel qui garantit les performances, la puissance et l'autonomie des portables dernière génération.

Lenovo Yoga Slim 7i Carbon. Prix indicatif : **à partir de 1199 €**

Smartphone à écran dynamique

▶ Plus rapide, plus performant (puce A16 Bionic oblige) et équipé d'un nouvel écran Super Retina XDR de 6,7 pouces, le fleuron des iPhone mise sur la photo (capteur 48 pixels, traitement logiciel pour les clichés en faible luminosité…) et accroît son autonomie (jusqu'à 25 heures en streaming vidéo). Principale innovation : la Dynamic Island, une zone qui enrichit l'affichage de l'écran en donnant un accès rapide aux activités en arrière-plan (playlists, cartes, minuteur…) en donnant un accès rapide aux activités en arrière-plan, comme les playlists, les cartes ou encore le minuteur.

Apple iPhone 14 Max Pro. Prix indicatif : **à partir de 1479 € (version 128 Go de stockage)**

Mobilité douce

▶ Déluge, flaques d'eau ou chemins boueux, rien n'arrête cette trottinette électrique (17,5 kg) qui se targue d'une autonomie de 60 km, atteignable en une seule charge de 9 heures et demie. Grâce à son moteur de 500 W, il est possible de grimper des côtes ou de rouler sur les pavés sans perdre de vitesse*. Sa plateforme large et ses pneus de 10 pouces garnis de fluide anti-crevaison permettent de se lancer sur des trajets longs, en sécurité.

Trottinette électrique Pure Air Pro LR. Prix indicatif : **799 €**

* Vitesse maximale conforme loi mobilités de 25 km/h.

Réduction de bruit

▶ Aussi à l'aise sous une pluie battante que dans un avion, ces écouteurs sans fil affichent une restitution sonore naturelle, riche et équilibrée, et proposent une panoplie d'options de personnalisation (réglage du son, de l'égaliseur, test pour déterminer l'embout idéal, commande tactiles assignables…). Leur système de suppression adaptative du bruit ultra-efficace traque le niveau sonore ambiant pour l'éliminer en temps réel. Grâce à l'étui chargeur, leur autonomie atteint les 28 heures.

Sennheiser Momentum True Wireless 3. Prix indicatif : **249,90 €**

DU 28 MAI AU 5 JUIN 2023

PARIS ✈ HAMBOURG
TROMSO ✈ PARIS

Jour	Escales	Arrivée	Départ
28/05	Paris / Hambourg / Kiel *(Allemagne)* ✈		17h00
29/05	Copenhague (Danemark)	07h00	13h00
30/05	Kristiansand	09h00	12h30
31/05	Bergen *(Norvège)*	07h00	14h00
01/06	Molde *(Norvège)*	07h00	18h00
02/06	Svartisen *(Norvège)* ⚓	20h00	23h00
03/06	Leknes / Îles Lofoten *(Norvège)* ⚓	08h00	14h00
04/06	Honningsvag / **Cap Nord**	17h30	
05/06	Honningsvag Tromso *(Norvège)* / Paris ✈	15h00	00h30 -

⚓ À l'ancre - Débarquement en chaloupe si les conditions météorologiques le permettent.

À partir de 2.690 €

par personne en **cabine intérieure, catégorie 2** occupée par **2 personnes.**

(vols internationaux inclus, **hors excursions optionnelles et pourboires facultatifs)**

Ce prix comprend :

- La croisière à bord du M/s Hamburg en pension complète du dîner du 1er jour au petit déjeuner du dernier jour, boissons aux repas incluses.
- Les vols (réguliers ou affrétés) Paris-Hambourg et Tromso-Paris.
- La présence (sauf raison de force majeure) pendant toute la croisière, et les conférences, des scientifiques invités par *Sciences et Avenir - La Recherche*.
- Des animations de qualité chaque soir, (variétés, soirée classique etc.).
- L'équipe d'encadrement Plein Cap.
- Les assurances assistance rapatriement.

Les croisières du SAVOIR
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

« DU CERVEAU PRÉHISTORIQUE À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE LE FUTUR A DÉJÀ COMMENCÉ »

Comment fonctionnent le cerveau, la mémoire ? L'intelligence, qu'est-ce que c'est ? Et l'intelligence... artificielle ? Pour quoi faire ? Que pouvons-nous en attendre, ou en craindre ? Nous en débattrons !

CAP NORD ET FJORDS DE NORVÈGE

à bord du M/s Hamburg (200 cabines, 380 passagers)

MATHIEU NOWAK
Rédacteur en chef de *Sciences et Avenir - La Recherche*

Embarquons pour deux voyages. Le premier, exploratoire, dans les fjords de Norvège, d'extraordinaires vallées creusées par les glaciers depuis trois millions d'années. Le second, cérébral, à la découverte de l'organe le plus fascinant qui soit, le cerveau humain, qui depuis trois millions d'années également, ne cesse d'évoluer. Faisant fonctionner dans une harmonie mystérieuse plus de 100 milliards de neurones, origine de la conscience et de l'intelligence.

Ces deux voyages seront une rencontre saisissante entre forces de la nature et de l'évolution qui poseront, au-delà de la fascination, la question de l'avenir. Celui de paysages encore extraordinairement préservés, comme celui d'un organe que l'on peine à comprendre mais que l'on veut imiter.

Pour ce périple *Sciences et Avenir - La Recherche* a réuni des spécialistes de paléoanthropologie, de neurologie, d'intelligence artificielle et d'éthique qui nous expliqueront comment le cerveau humain a évolué, comment les chercheurs développent des techniques d'imagerie ultra-perfectionnées pour suivre son activité en temps réel et comment des ingénieurs imaginent l'imiter pour développer des intelligences dites artificielles afin de décupler ses capacités et en doter des robots. Vous participerez avec eux à une riche réflexion pour tenter de dessiner un futur dans lequel la science permettrait de mieux vivre, mieux vieillir, et mieux prendre soin de la planète. M. N.

Pour vous apporter leurs connaissances avec passion et pédagogie nos invités scientifiques seront avec vous pendant toute la croisière *

*** Sauf raison de force majeure**

LAURENCE DEVILLERS

© Olivier Ezratty

Informaticienne, professeure en informatique appliquée aux sciences humaines et sociales à Sorbonne Université. Elle dirige au CNRS la chaire de recherche en intelligence artificielle (IA) HUMAAINE et nous parlera des dimensions affectives de la relation homme-robots.
Dernier ouvrage paru : *Les Robots émotionnels (L'Observatoire 2020).*

JEAN-GABRIEL GANASCIA

© Dominique Lévy-Breillet

Informaticien, philosophe, professeur à Sorbonne Université et au Laboratoire informatique de Paris 6 (LIP6).
Ancien président du comité d'éthique du CNRS il évoquera les bénéfices et les risques de « l'existence en ligne » et nous dira ce que l'on peut attendre et/ou craindre de l'intelligence artificielle,
Dernier ouvrage paru : *Servitudes virtuelles* (Seuil, 2022).

ANTOINE BALZEAU

Paléoanthropologue, directeur de recherche au CNRS et au MNHN, il travaille au Musée de l'Homme. Ses travaux concernent les caractéristiques internes du crâne des fossiles et les indications qu'elles nous donnent sur les capacités biologiques des humains préhistoriques.
Dernier ouvrage paru : *Brève histoire des origines de l'humanité* (Tallandier, 2022).

FRANCIS EUSTACHE

© INSERM/Mehrak

Neuropsychologue, professeur à l'École pratique des hautes études de Paris et à l'Université de Caen-Normandie. Il est l'un des premiers chercheurs à avoir utilisé l'imagerie cérébrale pour étudier le fonctionnement cognitif et la mémoire humaine. Il nous expliquera comment fonctionne notre cerveau !
Dernier ouvrage paru : *La mémoire au futur* (Le Pommier, 2018).

Avec aussi

ANDREINA DE BEI

© Bernard Martinez

Rédactrice en chef photo de *Sciences et Avenir - La Recherche*

qui ira à votre rencontre et vous fera bénéficier de ses « secrets photo » !

Une occasion exceptionnelle de larguer les amarres pour vivre neuf belles journées d'évasion entre ciel et terre. Des journées denses, rythmées par les nombreux plaisirs de la vie à bord, de passionnantes conférences et des rencontres avec des compagnons de voyage partageant les mêmes motivations et les mêmes curiosités.
Et bien sûr les excursions à la découverte de ces terres septentrionales aux somptueux paysages dont vous garderez un souvenir inoubliable !

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **PLEIN CAP « Croisière du Savoir »**

CROISIÈRES PLEIN CAP : **251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET - info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20**

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : croisiere-du-savoir.fr

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

ZHOUZHIYONG/SIPA

Notre planète, née d'une longue suite d'événements cosmiques, serait seule à abriter la vie.

Le vivant, une exception terrienne

Les connaissances acquises grâce à l'exploration spatiale démontrent que la Terre n'a pas d'équivalent dans l'Univers, estime l'astrophysicien Jean-Pierre Bibring.

PARADIGME Et si la vie était le propre de la Terre, ayant émergé à la suite de si nombreux hasards et contingences qu'ils ne pourraient être reproductibles ailleurs ? C'est la théorie convaincante développée par l'astrophysicien Jean-Pierre Bibring dans son dernier ouvrage *Seuls dans l'Univers*. Depuis soixante ans, l'exploration spatiale a révolutionné notre manière de concevoir notre place dans l'Univers. Les échantillons lunaires ont permis de comprendre que notre satellite était né de la collision d'une petite planète avec la Terre. Un cataclysme qui serait à l'origine de la stabilité climatique de notre planète et de la pérennité de ses océans, ainsi que du devenir de la surface terrestre et de l'atmosphère.

L'astrophysicien, qui a participé à plusieurs missions d'exploration du Système solaire, s'étonne de la très grande diversité des corps visités, depuis la très volcanique lune de Jupiter Io jusqu'à Callisto, dont la surface cratérisée est totalement inactive, en passant par l'absence de vie martienne, les lacs d'hydrocarbures de Titan, etc. La découverte des exoplanètes n'a fait qu'accroître ce constat que chaque nouveau monde est unique, conditionné par le chaos des conditions initiales de sa formation et des hasards qui forgent son évolution. De même que chaque individu d'une population est différent des autres, *« il semblerait que la diversité domine, de l'échelle des molécules du vivant à celle des mondes planétaires et exoplanétaires »*, conclut l'auteur. La vie elle-même pourrait ainsi n'être qu'un trait de caractère particulier à la Terre. Nous assistons ici à un changement de paradigme, l'idée d'une diversité des mondes remplaçant celle de leur pluralité. ■ **Sylvie Rouat**

Seuls dans l'Univers, Jean-Pierre Bibring, Odile Jacob, 264 p., 23,90 €

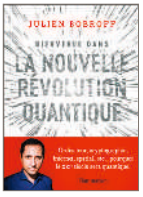
Voyages au cœur de la Terre

RÉCIT *« Les roches sont le temps incarné. Chaque centimètre représentait environ mille ans »*, écrit Helen Gordon, face à des couches géologiques du Leicester (Royaume-Uni) datant de l'ère des dinosaures. C'est cette histoire des temps géologiques lointains que la journaliste britannique remonte à l'aide de reportages et de rencontres avec des scientifiques d'aujourd'hui et d'hier. Elle nous fait ainsi voyager dans les paysages passés d'Europe et d'Amérique du Nord. Un récit très accessible. ■ **S. R.**

Le Temps profond de la Terre, Helen Gordon, éditions Quanto, 360 p., 22 €

Par-delà l'ordinateur quantique

PANORAMA Vulgarisateur hors pair, le physicien Julien Bobroff explique les notions les plus complexes de la physique quantique et raconte les percées récentes en matière de production de photons uniques, simulateurs à atomes neutres, cryptographie quantique… Et l'ordinateur quantique ? Julien Bobroff déconstruit l'engouement actuel autour de ce *« graal quantique »*, moins avancé que d'autres technologies (horloges atomiques, interféromètres quantiques, etc.). Instructif. ■ **V. G.**



Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique, Julien Bobroff, Flammarion, 338 p., 21 €

Vision nocturne

MANIFESTE Soyons les amis de la nuit ! Car le vivant repose sur une alternance équilibrée entre clarté et obscurité. En son honneur, le spécialiste des chauves-souris Johan Eklöf écrit un manifeste, une zoologie de la nuit riche et poétique, truffée d'observations sur le terrain. Il y met en évidence la dépendance vitale de nombre d'animaux à la nuit, décrit le fonctionnement de l'œil, décortique l'action de la lumière sur nos organismes, raconte les recherches menées pour lutter contre la pollution lumineuse. ■ **A. De B.**

Osons la nuit. Manifeste contre la pollution lumineuse, Johan Eklöf, Tana éditions, 272 p., 19,90 €

Sous les pavés, les rats

IMAGE Le rat n'a jamais eu bonne presse en France. Animal impur dans la Bible, au XIXe siècle il devient en outre associé à la maladie. Et pourtant, la population citadine semble redécouvrir le rongeur à intervalles réguliers, notamment à Paris. C'est à ce paradoxe que s'est attaqué Olivier Thomas, rédacteur en chef adjoint du magazine *L'Histoire* (qui appartient au même groupe que *Sciences et Avenir*), en défrichant le terrain car *« cet animal n'a été que peu étudié d'un point de vue historique »*. En ressort un ouvrage érudit et passionnant. ■ **M. N.**

Les rats sont entrés dans Paris, Olivier Thomas, Vendémiaire éditions, 228 p., 22 €

Ces vestiges oubliés d'une guerre totale

ARCHÉOLOGIE Que peuvent bien raconter les archéologues sur le monde contemporain, qui ne soit pas déjà abordé par les historiens ? À cette question, Vincent Carpentier, spécialiste de l'archéologie de la Seconde Guerre mondiale, offre une réponse passionnante. Son livre s'impose ainsi comme une synthèse approfondie sur les objets d'étude que sa discipline, toute nouvelle dans le paysage de la recherche, a fait émerger : les camps de prisonniers allemands en France (comme celui de La Glacerie, près de Cherbourg), les strates de guerre (matériaux et détritus issus des destructions consécutives aux bombardements et enfouis dans le sol), les restes d'édifices et de matériels de guerre (longtemps relégués au rang de vulgaires « pollutions »), des théâtres d'affrontement oubliés (îles de l'archipel des Palaos, dans le Pacifique, par exemple)… Formidable mine d'informations, l'ouvrage soulève par ailleurs d'intéressantes réflexions sur la manière de gérer ce patrimoine souvent inesthétique. Magistral. ■

Vincent Glavieux

Pour une archéologie de la Seconde Guerre mondiale, Vincent Carpentier, La Découverte, 368 p., 24 €

Cyberespace, champ de bataille

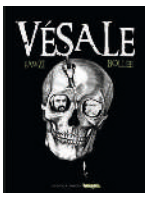
GÉOPOLITIQUE Eviatar Matania est le fondateur en 2012 du Bureau national du cyber israélien, explorant une voie nouvelle à l'époque : défendre le pays contre les cyberattaques visant des infrastructures critiques, civiles ou militaires.

L'histoire, passionnante, est donc racontée de l'intérieur. On voit également le Bureau amorcer l'articulation entre défense nationale, recherche universitaire et écosystème de start-up en cybersécurité, pour faire d'Israël un modèle de cyberpuissance. ■ **A. D.**

CyberPower, Eviatar Matania et Amir Rapaport, Les Arènes, 318 p., 22,80 €

Rivalité chirurgicale à la Renaissance

BD 30 juin 1559. À l'occasion d'un tournoi, le roi de France Henri II est grièvement blessé : la pointe de lance de son adversaire se plante dans son orbite jusqu'au cerveau. Les 10 jours d'agonie qui suivent seront l'objet d'une *disputatio* entre le chirurgien royal Ambroise Paré et le grand anatomiste André Vésale. Avec, en point d'orgue, la décision d'infliger la même blessure à quatre prisonniers pour trouver le meilleur moyen de retirer la lance. Un épisode restitué de façon convaincante grâce à un dessin réaliste et un scénario bien documenté. ■ **H. J.**



Vésale, Laurent-Frédéric Bollée et Fawzi Baghdadli, Passés Composés, 56 p., 14,90 €

EXPOSITIONS

Les Eyzies (24)

Oxydes, couleurs et métaux
Peintures pariétales, décors d'objets, parures, armes… Les peuples préhistoriques ont su extraire de la terre et de la roche les oxydes métalliques pour divers usages. Cette exposition met en avant des collections méconnues.
Musée national de préhistoire, 1, rue du musée, jusqu'au 9 mai. Rens. : 05.53.06.45.45.

Nantes (44)

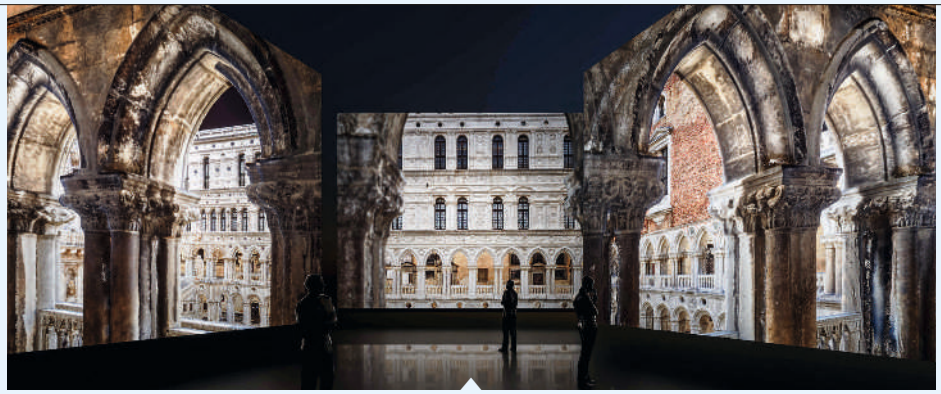
Inde, reflets de mondes sacrés
Créée en collaboration avec le Museo delle Civiltà de Rome, cette exposition se consacre aux trois religions natives de l'Inde, l'hindouisme, le jaïnisme et le bouddhisme. Plus de 200 objets couvrent 1300 ans d'art et de traditions folkloriques et tribales.
Lire notre reportage : sciav.fr/910Inde
Musée d'Histoire de Nantes, 4, place Marc-Elder, jusqu'au 23 avril. Rens. : 08.11.46.46.44.

Nîmes (30)

Dévoiler Nemausus. Jean-Claude Golvin, un architecte et des archéologues
Ancien chercheur au CNRS, Jean-Claude Golvin a restitué sous forme d'aquarelles les grands sites antiques, en respectant les données scientifiques. Une cinquantaine d'œuvres explorent la Nîmes romaine.
Musée de la Romanité, 16, boulevard des Arènes, du 8 décembre au 5 mars 2023. Rens. : 04.48.21.02.10.

Paris (75)

Afghanistan, ombres et légendes
La Délégation archéologique française en Afghanistan (Dafa) a eu 100 ans en 2022. Pour l'occasion, cette exposition raconte un siècle de recherches et de découvertes sur place, mettant en valeur une des plus belles collections afghanes en Occident.
Musée national des arts asiatiques Guimet, 7, avenue d'Iéna, jusqu'au 6 février. Rens. : 01.58.52.53.00.



ICONEM

Des Images en 3D permettent aux visiteurs de déambuler au cœur des joyaux architecturaux de la ville.

Paris (75) / Exposition

Venise révélée

Le long du Grand Canal, les gondoles se balancent et les palais défilent sous vos yeux, grâce à une vidéo qui vous embarque au fil de l'eau, sous l'arcade du pont de Rialto… Le Grand Palais immersif, nouveau lieu parisien voué aux expositions numériques, met en scène les secrets de la Sérénissime : les architectures de la place Saint-Marc et du palais des Doges se matérialisent tout en filigrane et transparences sur d'immenses écrans, et les fresques monumentales abritées par le lieu du pouvoir vénitien prennent corps en une fulgurance de détails. Un va-et-vient entre photographies, audiovisuels pédagogiques et installations numériques permet d'appréhender les techniques de construction de ce fragile bijou, les clés de l'équilibre lagunaire et les projets de sauvegarde. L'exposition découle d'un chantier inouï de modélisation 3D de Venise réalisée par photogrammétrie par la société Iconem, connue pour ses travaux autour du patrimoine culturel en danger. Un spectacle à ne pas manquer ■

Andreina De Bei

Grand Palais immersif, 110, rue de Lyon, jusqu'au 19 février. Rens. : 01.40.13.48.00.

Phénomènes. L'inexpliqué face à la science
Dans le cadre du festival PhotoSaintGermain, 120 photographies nous emmènent aux marges de la science, quand médecins et médiums se piquaient de documenter de prétendus cas de télékinésie, de magnétisme ou de lévitation.
Musée d'Histoire de la médecine, 12, rue de l'École-de-Médecine, jusqu'au 28 janvier. Rens : 01.76.53.16.93.

Musicanimale
La saison 2022-2023 de la Philharmonie prend pour fil rouge l'articulation entre la musique et le vivant. Sur 850 m², des œuvres plastiques, sonores, visuelles, musicales et les sons de quelque 40 espèces animales soulignent l'existence d'un patrimoine et d'une diversité menacés.
Philharmonie de Paris, 221, avenue Jean-Jaurès, jusqu'au 29 janvier. Rens.: 01.44.84.44.84.

Toulouse (31)

Momies : corps préservés, corps éternels
La momification n'était pas pratiquée chez les seuls Égyptiens de l'Antiquité. Un panorama bien plus vaste de cette pratique est proposé ici. Y compris en évoquant des processus naturels *(lire aussi p. 76)*.
Lire notre reportage : sciav.fr/910momie
Muséum, 35, allées Jules-Guesde, jusqu'au 2 juillet. Rens. : 05.67.73.84.84.

FESTIVAL

Aix-en-Provence (13)

Biennale des imaginaires numériques
Réparti entre Aix-en-Provence, Marseille et Avignon, ce festival d'arts numériques prend la nuit pour thème. Les installations convoquent vidéo, réalité virtuelle, immersions en sons et lumières, *deep learning*, neurosciences, au service d'une réflexion sur la place de l'humain au cœur des technologies.
Jusqu'au 22 janvier. Rens. : 04.95.04.95.12 et sur le site chroniques.org

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE DÉCEMBRE

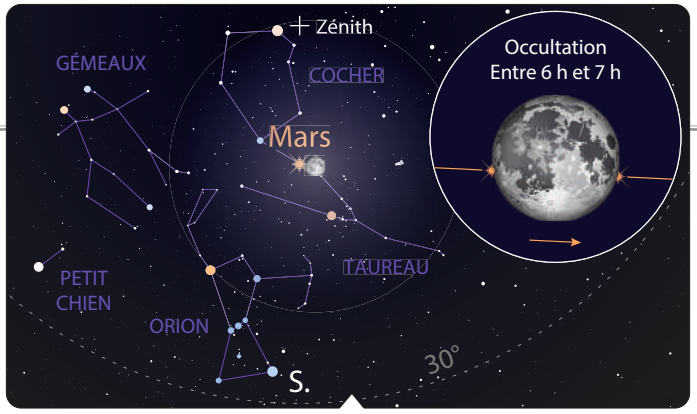
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE
La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (20°) à l'est du Soleil le 21. Elle est observable en seconde quinzaine peu après le coucher du Soleil, très bas vers le sud-ouest.

VÉNUS
Après une brève période d'invisibilité, l'étincelante étoile du Berger fait son grand retour dans le ciel du soir. Une réapparition encore timide, puisque la planète ne se couche que 50 minutes après le Soleil le 15 et 1 h 20 min après lui le dernier jour de l'année.

MARS
Le mois est idéal pour tourner une lunette astronomique ou un télescope vers la planète Rouge. Avec un grossissement d'une centaine de fois, vous devriez parvenir à distinguer son disque et le point blanc qui signale la calotte polaire.



Vers minuit, Mars est proche de sa culmination, à très bonne hauteur dans nos ciels européens. Encore située à près de 3° de là, la Lune pleine ne tardera pas à l'occulter.

La Lune occulte Mars le jour de son opposition

LA PLANÈTE ROUGE PASSE À L'OPPOSITION LE 8 DANS LA CONSTELLATION DU TAUREAU. Située dans la direction opposée au Soleil, elle est donc visible toute la nuit ce mois et dans des conditions idéales d'observation. Au cœur de la nuit, son éclat couleur caramel n'est surpassé que par celui de la Lune et de Jupiter. Le matin du 8, Mars sera occultée par la Lune entre 6 h et 7 h environ.

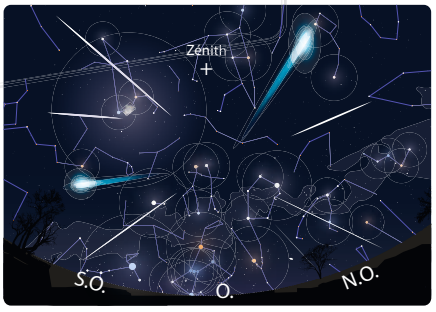
Notre conseil Suivre l'occultation de Mars par la Lune le 8 nécessitera un horizon ouest dégagé car ce phénomène ne se déroulera qu'à une vingtaine de degrés de hauteur.

JUPITER
La plus grande des planètes, située dans la constellation des Poissons, est visible dès la tombée de la nuit vers le sud-est. Elle culmine vers le sud en soirée, à une quarantaine de degrés de hauteur. Très brillante, Jupiter est immanquable.

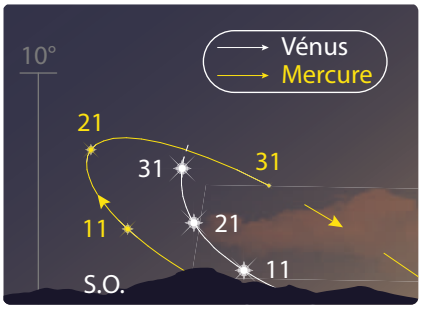
SATURNE
La planète aux anneaux est déjà sur la pente descendante de son parcours dans notre ciel lorsque la nuit tombe. Point moyennement brillant, Saturne se couche en soirée vers le sud-ouest.

L'appli du mois

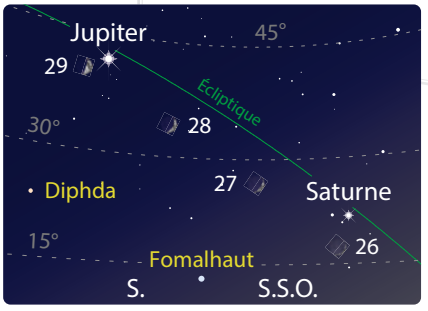
PHOTOPILLS
est une application payante en français (10,99 €) pour Android et iOS. Elle facilite la planification et la prise de vue de paysages sous le Soleil, la Lune, les étoiles et la Voie lactée. De plus, la réalité augmentée permet à chacun d'améliorer son art de la composition en photographie.



DURANT LA FIN DE LA NUIT DU 13 AU 14, la pluie d'étoiles filantes des Géminides devrait nous offrir un beau spectacle, malheureusement terni par l'éclat de la Lune.



LES SOIRS DE DÉCEMBRE, 30 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, tentez l'observation de Mercure et de Vénus, très basses vers le couchant. Horizon pur et dégagé obligatoire !



DU 26 AU 29, LA LUNE EN PREMIER CROISSANT rendra successivement visite à Saturne et Jupiter. Nous sommes ici 1 h après le coucher du Soleil, quasiment tournés vers le sud.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de décembre

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

A. BILLET/ UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Actions individuelles ou transformations systémiques ?

Produire le bilan carbone d'une activité (chauffer un bâtiment, faire un trajet en voiture…) consiste à décompter les émissions de gaz à effet de serre sur le « cycle de vie » de cette activité. Par exemple pour un déplacement, le bilan va de la construction de l'automobile à son élimination en fin de vie, en passant par son usage (énergie nécessaire pour le déplacement, etc.). Cette comptabilité peut s'appliquer à des particuliers, des entreprises, des collectivités, etc. Elle permet de comprendre l'ampleur de l'empreinte carbone des activités et de prioriser les actions pour la réduire le plus efficacement possible.
À titre individuel, le plus utile pour limiter l'empreinte carbone sera probablement de se déplacer davantage à pied, à vélo et en transport en commun et moins en voiture, de manger moins de viande de ruminant, de faire isoler son logement, d'éviter de prendre l'avion, ou les quatre, selon les situations personnelles. Mais notre potentiel d'action ne se limite pas à ce que nous faisons en tant que consommateurs. Nous sommes aussi citoyens, participants à des organisations, investisseurs… Si les actions individuelles sont utiles, elles doivent s'adosser à des actions collectives indispensables pour transformer nos villes et nos territoires, nos infrastructures, nos modes de production, nos normes sociales, et construire l'accès pour tous aux solutions décarbonées. Réaliser ces transformations systémiques est une tâche immense. Le temps est compté, alors arrêtons de renvoyer dos à dos changements individuels et changements systémiques et reconnaissons que les deux sont essentiels ! ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER/HANS LUCAS

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

Toucher du doigt l'infini

Verre, aluminium, laine, bois, acier. Ces matériaux de construction sont également prisés par des artistes sculptant des formes aussi esthétiques que mathématiques. Les *Nœuds sauvages* de Jean-Michel Othoniel, colliers géants de perles en verre soufflé ou en inox, reflètent une théorie développée par le mathématicien mexicain Aubin Arroyo. Les *Aiguilles* de Toshimasa Kikuchi représentent dans de splendides bois laqués des surfaces de courbure négative constante, une propriété partagée par les pseudosphères en aluminium d'Hiroshi Sugimoto. Ces surfaces qui, en chaque point (ou presque), ressemblent à une selle de cheval relèvent de la géométrie dite hyperbolique. Les coraux multicolores imaginés par Christine et Margaret Wertheim et réalisés au crochet par une multitude de volontaires sont une autre manière de toucher du doigt cette géométrie bien particulière, tout en militant pour la protection des récifs coralliens ! Si elles font appel à une géométrie plus classique, les monumentales surfaces en acier constituant *La Matière du temps* de Richard Serra n'en sont pas moins fascinantes. Au travers de l'émotion esthétique qu'elles suscitent, toutes ces œuvres semblent plus tangibles que les concepts mathématiques qu'elles abritent. Pour autant, elles n'en représentent qu'une forme tronquée.
Elles suggèrent l'infini sans pouvoir le montrer tout à fait. À nous alors de l'imaginer. ■

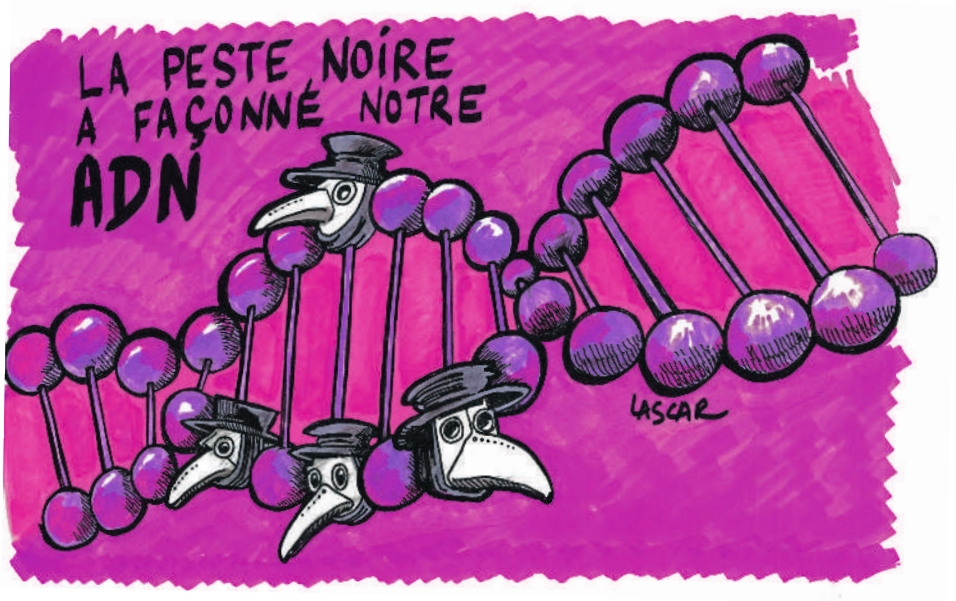
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Vices et vertus d'un stylo « intelligent »

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

En juillet dernier, une collégienne de la province du Hainan en Chine expliqua sur le réseau social Xiao Hong Shu que le professeur avait distribué à tous les élèves de sa classe des stylos intelligents de la marque « LePen » en exigeant qu'on les utilise pour les devoirs de vacances. Munis d'une caméra, ces stylos enregistrent tous les déplacements de leur tête d'écriture sur le cahier d'écolier où ils se repèrent grâce à une matrice imprimée en filigrane, et quasi imperceptible à l'œil nu. Ces mouvements du stylo se transmettent ensuite par le réseau à l'équipe pédagogique avant d'être stockés sur le nuage [*cloud*]. Grâce à un logiciel programmé avec des techniques d'intelligence artificielle, l'enseignant sait combien de temps chaque élève a passé sur chacune des questions et dans quel ordre il les a traitées, ce qui lui permet d'assurer un suivi personnalisé et de mesurer, à tout instant, les progrès accomplis. Dans son message, la collégienne du Hainan se plaignait d'avoir eu ses vacances ruinées par le maudit stylo et la contrainte morale qu'il exerçait. Relayée par des congénères se trouvant dans la même situation, la nouvelle devint rapidement virale. Expérimenté à partir de 2021, lors de la pandémie de Covid-19, ce dispositif permettait de maintenir l'activité scolaire en dépit du confinement. Comment s'en plaindre ? Mais, le soir, le week-end ou en période de vacances, beaucoup le ressentent comme oppressant, même s'il améliore les acquis des élèves, ce qui reste à prouver. Déjà, en 2019, les Chinois évoquaient la pose de capteurs d'ondes cérébrales sur le crâne des écoliers pour évaluer leur concentration en salle de classe. Certains argumenteront du risque de voir la France « décrocher » par rapport à la Chine pour justifier l'introduction de tels dispositifs dans les écoles de notre pays. On éprouve un froid dans le dos rétrospectif à l'idée qu'on aurait pu être contraint de la sorte et l'on se réjouit d'être né à une autre époque. Mais, saurons-nous préserver nos enfants et nos petits-enfants du stylo « LePen » ? ■



L'ŒIL DE LASCAR

Il y a 700 ans, la peste noire a semé la mort en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. En comparant les ADN de victimes et de survivants, les scientifiques ont identifié quatre gènes ayant pu conférer une résistance accrue aux êtres humains. Les gens porteurs de ces mutations survivaient à la bactérie *Yersinia pestis* ; ils passaient donc ces gènes à leurs descendants. Revers de la médaille : ces personnes pouvaient avoir un système immunitaire trop actif, qui se retournait contre eux et provoquaient des maladies auto-immunes…

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ÉTHOLOGIE

Pourquoi les oiseaux migrateurs volent-ils en V ?

Hamid R.

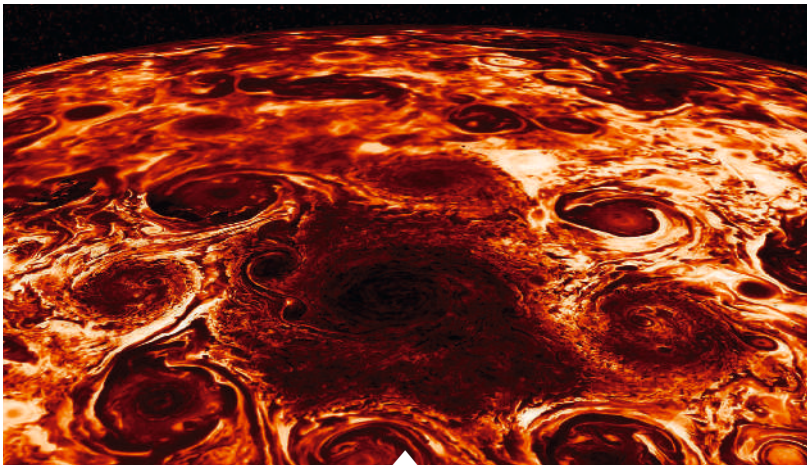
Oies, canards, grues, cygnes… Les grands oiseaux migrateurs adoptent souvent le vol en V pour pouvoir se relayer à la tête de leur formation, la position la plus fatigante. Des chercheurs de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) ont suivi en 2015 le vol de 14 ibis chauves lors d'une migration entre Salzbourg (Autriche) et Orbetello (Italie). Chaque oiseau changeait fréquemment de position dans la formation de vol, de sorte que chacun passait en moyenne 32 % du temps à bénéficier du courant ascendant produit par le battement des ailes des ibis devant lui. Nulle inégalité dans le groupe : chaque membre passait environ le même temps à la tête de la formation. ■ **L. L.**

ÉNERGIE

Qu'est-ce qui différencie l'essence du gazole ?

Vincent B.

L'essence et le gazole (aussi nommé diesel), les carburants les plus utilisés en France, sont tous deux issus du pétrole brut, un mélange d'hydrocarbures (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène). Dans une tour de distillation haute de 60 mètres et chauffée à 400 °C, les pétroliers séparent les hydrocarbures légers (majoritairement de l'heptane) qui constituent l'essence, des hydrocarbures plus lourds, tel le cétane, qui forment le gazole. Dans les moteurs à essence, l'allumage est engendré par une étincelle électrique (bougie). Dans un diesel, il est réalisé par compression de l'air à très haute pression (jusqu'à 2000 bars) : la chaleur ainsi créée permet d'allumer le gazole pour créer l'explosion. ■ **L. L.**



NASA/JPL-CALTECH/SWRI/ASI/INAF/JIRAM

Au pôle nord de Jupiter, planète gazeuse, un cyclone central entouré par huit autres a été photographié par la mission Juno.

ASTROPHYSIQUE

Pourquoi les planètes gazeuses ne prennent-elles pas feu ?

Virgile A.

Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ont beau être des planètes gazeuses composées principalement d'hydrogène et d'hélium, il leur est impossible de prendre feu ou d'exploser. *« Pour produire du feu, il faut trois choses : un combustible, un comburant et de quoi démarrer le feu, comme une étincelle ou une source de chaleur vive,* explique Fabrice Mottez, astrophysicien au Laboratoire Univers et théories de l'observatoire de Paris-Meudon. *Le combustible, c'est le gaz inflammable. Le comburant, c'est un autre gaz qui permet la combustion, et c'est en général de l'oxygène, mais ce peut être aussi de l'ozone. »* Sur Jupiter et Saturne, l'atmosphère contient beaucoup d'hydrogène, qui est un bon combustible. *« Mais il n'y a pas d'oxygène* [ou en traces infimes, largement insuffisantes pour faire un feu], *ni d'autre comburant. C'est pour cela que l'atmosphère de ces planètes ne prend pas feu. De même pour Uranus et Neptune : on y trouve des gaz comme l'hydrogène et le méthane, qui pourraient être combustibles, mais pas de comburant »*, ajoute le spécialiste.

Sur Jupiter et Saturne sévissent des orages, presque similaires à ceux qui détonnent sur Terre, avec de la foudre et des éclairs qui forment de grandes étincelles. *« Il est rassurant que les atmosphères de ces planètes soient privées de comburant, sans quoi, en prenant feu, elles changeraient rapidement d'état ! »*, conclut Fabrice Mottez. ■ **Lise Loumé** @Lise_Loume

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 909, novembre 2022

Quadrature magique

1	8	15	10	34
12	13	6	3	34
14	11	4	5	34
7	2	9	16	34
34	34	34	34	34	34

L'intrus dans l'alphabet

Dans tous ces mots, sauf SAPIN, les consonnes apparaissent dans l'ordre alphabétique et les voyelles dans l'ordre inverse.

Carré géodésique

8	2	4	1	6	7	5	3
3	6	5	7	2	1	4	8
4	7	3	2	1	6	8	5
6	4	1	8	5	3	7	2
7	8	6	5	3	4	2	1
1	3	2	4	8	5	6	7
5	1	8	6	7	2	3	4
2	5	7	3	4	8	1	6

Logique d'héritage

Belle a trois enfants, Anastasie en a deux et Céline un.

Il y a 5 propositions qu'on nommera 1, 2, 3, 4, 5 pour plus de facilité.

D'après 2, Belle a trois enfants, Marie et deux fils (3) puisqu'elle a la famille la plus nombreuse et que Laure ne peut être la sœur de Marie (5). Anastasie n'ayant pas de fille (2), Laure ne peut qu'être la fille de Céline qui n'a donc qu'un enfant (5). Il reste deux garçons qui sont donc les enfants d'Anastasie.

Carré illogique

ABCD est répété en colimaçon en débutant sur la case nord-est. Il reste donc à intervertir D et C de la troisième ligne.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 901
Le nucléaire peut-il être propre ?

N° 902 Quantique, la révolution du XXIe siècle

N° 903
Les arbres, gardiens de la Terre

N° 904 Les aliments qui augmentent l'espérance de vie

N° 905/906
Pourquoi ?
Dossier spécial

N° 907
Messages de l'univers lointain

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909
L'avant Big Bang

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 901 ❑ N° 902 ❑ N° 903 ❑ N° 904
❑ N° 905/906 ❑ N° 907 ❑ N° 908 ❑ N° 909

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Quatre 7 pour dix

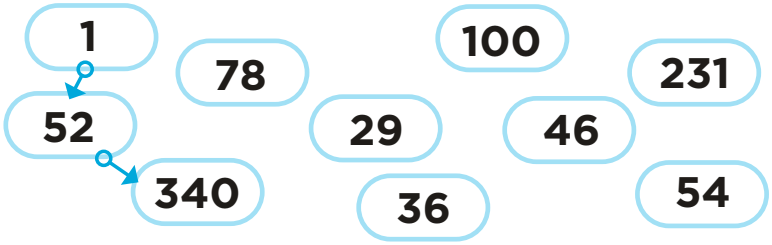
Saurez-vous exprimer les nombres de 1 à 10, en disposant en moyenne quatre 7 par chiffre, avec les quatre opérations et les parenthèses ? Par exemple pour zéro :

7 + 7 - 7 - 7 = 0

Certains chiffres sont faciles, avec plusieurs réponses possibles, mais d'autres sont plus difficiles.

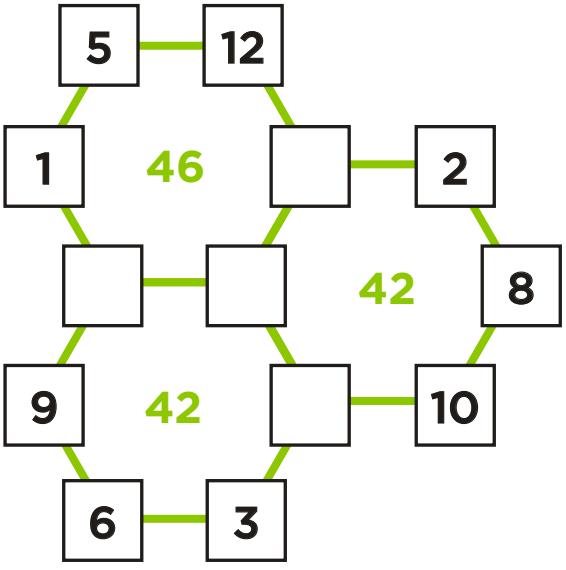
Parcours contrarié

Joignez ces dix nombres en partant de 1, sans passer deux fois par le même et sans qu'aucun n'ait de chiffre commun avec le suivant.

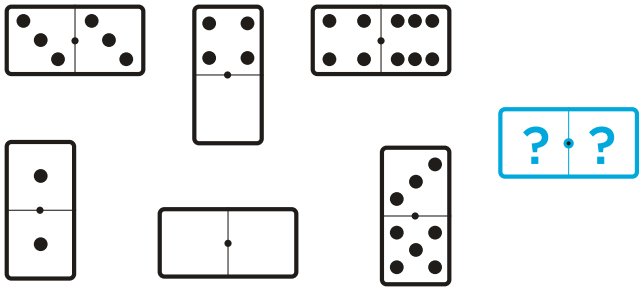


Hexagones numériques

Complétez ces hexagones magiques avec les nombres 4, 7, 11 et 13 pour que le centre de chaque hexagone soit la somme des six nombres qui l'entourent.



Quel domino manque-t-il ?



Logique pratique

On ne peut rêver de grandeur sans craindre l'échec.
Tout aliéné, un jour ou l'autre, se prend pour Napoléon.
Aucun poète ne craint d'échouer.
Se prendre pour Napoléon implique des rêves de grandeur.

En se basant sur ces quatre affirmations, peut-on envisager qu'un poète puisse être un aliéné ?

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LE 25 NOVEMBRE 2022

SIÈGE DE LA RÉGION DE STRASBOURG
ET EN DIGITAL

1 Place Adrien Zeller
67000 Strasbourg

Accueil dès 9h30

SANTÉ GLOBALE 1ÈRE ÉDITION

LE NOUVEAU DÉFI

LES RENCONTRES DU GRAND EST

Pour plus d'information :
lesrencontressanteglobale.fr

Partenaire institutionnel

Sous le patronage de

Partenaire

Organisé par

Avec

Coordonné par

Un plaisir infini

DANS UNE CAPSULE EN ALUMINIUM RECYCLABLE

En plus de préserver efficacement les arômes du café, l'aluminium est recyclable. C'est pourquoi L'OR s'engage à accélérer le recyclage des capsules usagées en développant leur collecte.

SCANNEZ-MOI

Découvrez si votre commune est éligible au recyclage des capsules aluminium en bacs de tri sélectif ou retrouvez les points de collecte proches de chez vous en scannant ce QR code ou en vous rendant sur www.lorespresso.com

SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

ALLIANCE POUR LE RECYCLAGE DES CAPSULES EN ALUMINIUM

NESPRESSO FRANCE A CRÉÉ LA FILIÈRE DE RECYCLAGE. JDE FRANCE A ÉTÉ LE PREMIER ACTEUR À S'ENGAGER AUX CÔTÉS DE NESPRESSO.

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE | 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EUROS.